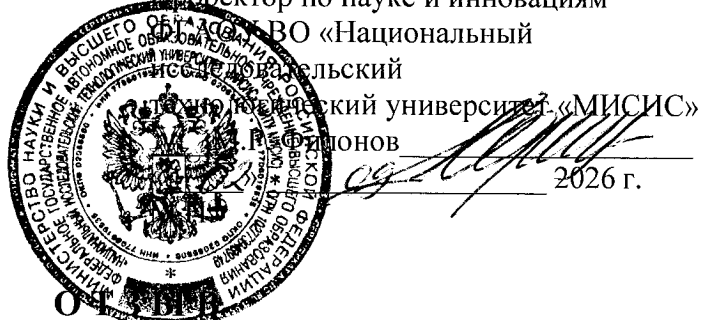


УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям



ведущей организации - федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, на диссертацию *Ефимова Дениса Александровича* на тему: «Повышение долговечности бандажей валковой дробилки карьерного дробильно-сортировочного комплекса с учетом процессов их абразивного изнашивания», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

1. Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Д.А. Ефимова посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения долговечности футеровочных бандажей валковых дробилок, применяемых в карьерных дробильно-сортировочных комплексах. Актуальность выбранного направления определяется тем, что надежность первичного дробильного оборудования непосредственно влияет на устойчивость циклично-поточной технологии открытой разработки месторождений, пропускную способность транспортно-технологической системы и величину эксплуатационных затрат. Интенсивное абразивное изнашивание рабочих поверхностей валков сопровождается изменением межвалкового зазора и геометрии зоны дробления, увеличением потерь энергии, сокращением межремонтных интервалов и ростом продолжительности простоев оборудования.

В работе в качестве характерного объекта рассмотрены условия разреза «Восточный» Экибастузского угольного бассейна. Перерабатываемая вскрышная толща характеризуется неоднородным литологическим составом, значительным содержанием песчаников, переменными физико-механическими свойствами, пределом прочности при сжатии до 120 МПа, высокой трещиноватостью и абразивностью, связанной в том числе с кварцсодержащим составом. На первичное дробление поступает крупнокусковой несортированный материал максимальной крупностью порядка 1000-2000 мм. В этих условиях двухвалковая дробилка полустационарной установки работает при сочетании ударно-сжимающего нагружения, относительного скольжения и абразивного взаимодействия, что формирует неблагоприятный режим работы футеровочных бандажей.

Актуальность исследования определяется тем, что традиционные способы повышения износостойкости рабочих органов дробильных машин нередко ориентированы на один фактор - выбор более износостойкого материала, наплавку или нанесение покрытия - и в меньшей степени учитывают изменение состояния поверхностного слоя в зависимости от времени наработки. Между тем фактическая интенсивность изнашивания определяется совместным влиянием контактных давлений, пути скольжения, текущей твердости, микрогеометрии поверхности, накопления усталостных повреждений, свойств перерабатываемой горной массы и геометрии рабочего органа.

Цель исследования сформулирована как повышение срока службы бандажей валковых дробилок карьерных дробильно-сортировочных комплексов при их абразивном изнашивании в

реальных условиях эксплуатации. Для достижения цели автором поставлены взаимосвязанные задачи, охватывающие анализ существующих теоретических и инженерных подходов, экспериментальное установление закономерностей формирования и деградации наклепанного поверхностного слоя, разработку математической модели локального изнашивания, комплексную экспериментальную верификацию и оценку технических решений по упрочнению и модернизации конструкции бандажей. Такая постановка соответствует логике исследования и позволяет последовательно перейти от анализа механизма повреждения к инженерным средствам повышения долговечности.

Тематика и полученные результаты соответствуют пункту 15 паспорта специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины», предусматривающему разработку методов и средств повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования. С учетом масштабов применения дробильно-перегрузочных комплексов на открытых горных работах и высокой стоимости внеплановых простоев задача, решаемая в диссертации, имеет как научное, так и прикладное значение.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна работы состоит прежде всего в развитии представлений о процессе абразивного изнашивания футеровочных бандажей как о стадийном процессе, в котором состояние поверхностного слоя изменяется в течение наработки. Автором экспериментально показана последовательная смена режима деформационного упрочнения (наклепа) и режима деградации упрочненного слоя, связанной с развитием усталостного выкрашивания, кавернообразования и вторичной микронеровности. Такой подход позволяет отказаться от упрощенного представления об износе как о процессе с постоянным коэффициентом и вводит в расчет текущее состояние рабочей поверхности.

Вторым новым результатом является количественная связь эволюции микрогеометрии с интенсивностью локального изнашивания. Для описания состояния поверхности используются параметры кривой Эбботта-Файрстоуна R_{pk} , R_k и R_{vk} и интегральный показатель $\Phi(t)$, характеризующий соотношение глубины впадин и несущей части профиля. Минимум соответствующих безразмерных отношений связывается с формированием плато-поверхности и максимальной несущей способностью, а последующий рост - с деградацией упрочненного слоя. На этой основе в модель введен коэффициент ускорения изнашивания $\beta(t)$, учитывающий изменение микрогеометрии во времени.

Научный интерес представляет введение коэффициента накопления усталости $\alpha(\tau)$, построенного с использованием функции Хевисайда и данных твердости HV_{10} и микротвердости $HV_{0,1}$. Предложенный критерий позволяет формализовать переход от стадии приработки и наклепа к стадии, на которой возрастает доля усталостного разрушения. Близость значений критерия, определяемых по двум независимым характеристикам твердости, служит дополнительным аргументом в пользу устойчивости предложенного диагностического подхода.

Новизна инженерной части работы заключается в комплексном рассмотрении двух групп мероприятий: поверхностного упрочнения покрытиями WC-TiN и изменения конструкции рабочих органов. Показано, что плазменно-порошковое напыление формирует упрочненный слой толщиной до 2,3 мм, повышает твердость и снижает среднюю скорость абразивного изнашивания. Одновременно исследованы сегментированные футеровочные бандажки и бандажки с профилем Рело, для которых установлено перераспределение контактной нагрузки и снижение пиков потребляемой мощности по сравнению с традиционными круглыми бандажами. Такой комплексный подход объединяет трибологическое состояние поверхности и геометрический фактор работы дробилки.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность положений диссертации обеспечивается последовательным использованием фундаментальных положений механики контактного взаимодействия, теории трения и изнашивания, классических подходов Арчарда, Рэя, Хрущева, Крагельского и принципов накопления повреждений. Автор не ограничивается прямым применением известных зависимостей, а анализирует ограничения традиционных моделей применительно к валковым дробилкам: постоянство свойств материала, отсутствие учета изменения твердости и шероховатости, невозможность описать переход от упрочнения к деградации и недостаточную связь накопленных повреждений с изменением геометрии поверхности.

Экспериментальная база является комплексной и включает стендовые и натурные исследования, измерение твердости HV10 и микротвердости HV0,1, оптическую и сканирующую электронную микроскопию, атомно-силовую/зондовую микроскопию, анализ профилограмм и кривых Эбботта-Файрстоуна, а также оптическое 3D-сканирование. В совокупности эти методы обеспечивают контроль различных масштабных уровней: от интегрального изменения геометрии и линейного износа до морфологии дефектов и микрорельефа поверхностного слоя. Применение взаимодополняющих методов повышает достоверность интерпретации механизма изнашивания.

Стадийность процесса подтверждена сериями образцов с различной наработкой. Для исходного состояния и приработки значения HV10 составляют 203-217, при максимальном наклепе возрастают до 274-283, после чего на стадиях деградации снижаются до 234-250 и далее до 203-211. Аналогичная тенденция получена по микротвердости HV0,1. Установленный максимум наклепа соотнесен с наработкой порядка 645 ч, а для покрытых образцов момент перехода к интенсивной деградации смещается приблизительно до 760 ч. Совпадение направленности изменений твердости, морфологии поверхности и параметров опорной кривой является существенным подтверждением принятой автором двухстадийной схемы.

Достоверность результатов по упрочняющему покрытию подтверждается микроструктурными исследованиями поверхности и зоны сопряжения, 3D-контролем однородности слоя и сравнительными испытаниями образцов с покрытием и без него. Для покрытых образцов приведены более высокие значения твердости и микротвердости, а снижение средней скорости изнашивания составляет 28-30 %. Коэффициенты детерминации при аппроксимации экспериментальных зависимостей превышают 0,97, а для отдельных зависимостей достигают значений, близких к единице, что свидетельствует о приемлемом соответствии выбранных аппроксимаций экспериментальным данным в исследованном диапазоне.

Математическая модель строится на локальном контактно-энергетическом соотношении, в котором величина износа зависит от контактного давления, твердости материала и пути скольжения. Развитие модели связано с введением $\beta(t)=1+\gamma\Phi(t)$, где $\Phi(t)$ определяется через параметры R_{pk} , R_k и R_{vk} . Тем самым в расчет вводится фактически измеряемая характеристика текущего состояния рабочей поверхности. Положительным является то, что модель ориентирована не на замещение сложных CFD/FEM-расчетов во всех случаях, а на инженерную оценку интенсивности изнашивания при наличии идентифицированных параметров и экспериментальных данных.

Основные результаты прошли апробацию на пяти научно-практических мероприятиях, включая международные. Личный вклад соискателя охватывает анализ исходных подходов, разработку модели, формирование и реализацию экспериментальной методики, а также обоснование технических решений. В целом совокупность расчетных, экспериментальных и эксплуатационных данных позволяет считать вынесенные на защиту положения обоснованными, а выводы - достоверными в пределах исследованных условий и принятых допущений.

4. Научные результаты, их ценность

Диссертация имеет последовательную структуру: введение, четыре главы, заключение, список литературы из 152 наименований и два приложения. Работа изложена на 136 страницах, содержит 77 рисунков и 9 таблиц. Содержание глав соответствует поставленным задачам, а переход от анализа условий эксплуатации к экспериментальной программе, математической модели и техническим решениям является логичным.

В первой главе выполнен анализ состояния проблемы повышения долговечности футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов. Рассмотрены условия применения горного оборудования на открытых работах, геолого-технологические особенности Экибастузского бассейна и разреза «Восточный», место двухвалковых дробилок в мобильных и полумобильных установках, конструктивные решения валков и факторы, влияющие на изнашивание. Показано, что абразивное разрушение поверхности определяется не только свойствами материала футеровки, но и сочетанием свойств горной массы, контактных нагрузок, геометрии валка, режимов работы и состояния поверхности. По результатам анализа обоснована необходимость комплексной методики, сочетающей диагностику, моделирование, упрочнение и рационализацию конструкции.

Во второй главе проанализированы эксплуатационные показатели валковых дробилок и теоретические основы изнашивания. Автором рассмотрены механизмы абразивного и усталостного разрушения, закон Арчарда, гипотеза Рэя, методика И.В. Крагельского, правило Минера, энергетические и контактно-механические подходы. Существенным результатом главы является выявление ограничений классических моделей применительно к реальной эволюции поверхности футеровочных бандажей. Показано, что рост износа отражается не только на геометрии рабочего органа, но и на коэффициенте технической готовности, продолжительности ремонтных простоев, энергоемкости и технико-экономических показателях дробильно-конвейерной системы.

Третья глава посвящена программе и методике экспериментальных исследований. Подробно описаны подготовка образцов, нанесение упрочняющих покрытий, проведение абразивных испытаний, измерения твердости, микроскопические исследования, определение параметров опорной поверхности и 3D-сканирование. Для исследования поверхностей использован комплекс приборных методов, позволяющий сопоставлять количественные показатели износа с морфологией поверхности. Особенно ценно, что параметры R_{pk} , R_k и R_{vk} не рассматриваются изолированно, а используются для интерпретации изменения несущей способности контактного слоя и последующего введения в математическую модель.

В четвертой главе получены основные научные и практические результаты. Экспериментально подтверждена двухстадийная природа изнашивания: рост твердости в период приработки и активного наклепа с последующим ее снижением и развитием усталостного разрушения. Установлены закономерности изменения параметров кривых Эбботта-Файрстоуна, предложены коэффициенты, характеризующие переход к деградации, выполнена оценка пространственной неравномерности износа по данным 3D-сканирования. Показано, что доля точек, выходящих за пределы принятого допуска при контроле изношенной поверхности, достигает 78,78 %, что подтверждает необходимость учета локальности повреждения при оценке ресурса.

Разработанная математическая модель локального абразивного изнашивания дополняет базовое контактно-энергетическое соотношение коэффициентом $\beta(t)$, зависящим от эволюции микрогеометрии. Значение модели заключается в том, что параметры ее корректировки могут быть получены из реальных измерений профиля, а значит, модель потенциально может быть включена в процедуры технической диагностики и прогнозирования состояния футеровки. Автор также показал связь деградации поверхности с энергетическими показателями: в исследованной модели пиковая

мощность возрастает с 502 Вт в начале наработки до 970 Вт в конце, что используется как дополнительный эксплуатационный признак ухудшения контактного взаимодействия.

Практически значимым является результат по применению WC-TiN. Плазменно-порошковое напыление обеспечивает формирование упрочненного слоя толщиной до 2,3 мм без выявленных при микроструктурном контроле адгезионных дефектов. Средняя скорость абразивного изнашивания упрочненных образцов на 28-30 % ниже, чем у образцов без покрытия; кроме того, отмечено смещение момента перехода к стадии деградации примерно с 645 до 760 ч. Это позволяет рассматривать покрытие не только как способ увеличения исходной твердости, но и как средство продления периода устойчивого состояния поверхности.

В конструктивной части предложены сегментированные футеровочные бандаж и бандаж с профилем Рело. Сегментированное исполнение защищено патентом на изобретение № 2831453. По результатам расчетно-экспериментальной оценки указанные решения обеспечивают перераспределение контактной нагрузки, уменьшение локальных зон износа и снижение пиковой мощности на 16 и 10 % по сравнению с круглыми бандажами соответственно. Дополнительным преимуществом сегментации является потенциальное повышение ремонтпригодности за счет возможности замены локально изношенных элементов.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени опубликованы: по теме работы имеется 4 печатные работы, в том числе 2 статьи в изданиях из Перечня ВАК и 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus. Получен 1 патент на изобретение и зарегистрирована 1 заявка на изобретение. Содержание публикаций соответствует основным направлениям диссертации и отражает ключевые результаты по процессам изнашивания, конструктивным решениям и повышению износостойкости.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость работы определяется развитием модели абразивного изнашивания рабочих органов горных машин за счет учета нестационарного состояния поверхностного слоя. Введение параметров, характеризующих эволюцию микрогеометрии и накопление усталостных повреждений, позволяет связать классическое контактно-энергетическое описание с фактически измеряемыми параметрами поверхности. Это создает предпосылки для дальнейшего развития расчетов остаточного ресурса, в которых коэффициент изнашивания не задается постоянным на весь срок эксплуатации, а корректируется по данным диагностики.

Практическая значимость выражается в разработке комплекса мероприятий, включающего экспериментальную диагностику поверхности, применение плазменно-порошкового покрытия WC-TiN, корректировку межремонтных интервалов и модернизацию геометрии футеровочных бандажей. Результаты работы могут применяться при проектировании, модернизации и эксплуатации мобильных и полумобильных дробильно-сортировочных установок, перерабатывающих абразивные материалы с пределом прочности до 120 МПа. В диссертации приведен акт использования результатов в ООО «ЗД ПРОЕКТ» от 10 декабря 2025 г.

В работе также заявлена возможность многократного восстановления изношенных футеровок с использованием плазменного напыления и экономическая выгода до 20 % по сравнению с традиционными методами восстановления. В совокупности с уменьшением средней скорости изнашивания, увеличением продолжительности устойчивой стадии и снижением пиковых энергетических нагрузок это формирует основу для снижения удельных эксплуатационных затрат в течение жизненного цикла рабочих органов дробилки.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные результаты целесообразно использовать на предприятиях открытой разработки месторождений, эксплуатирующих мобильные и полумобильные дробильно-перегрузочные комплексы с валковыми дробилками при переработке абразивных вскрышных и рудных материалов. В первую очередь рекомендации могут быть апробированы и развиты применительно к условиям разреза «Восточный» Экибастузского бассейна, на базе которого сформирована исходная эксплуатационная постановка исследования.

Методику контроля поверхности по твердости, микротвердости, параметрам кривых Эбботта-Файрстоуна и данным 3D-сканирования целесообразно включать в регламенты технического диагностирования и планирования ремонта рабочих органов дробильного оборудования. Параметр $\Phi(t)$, а также отношения R_{pk}/R_k и R_{vk}/R_k могут рассматриваться как дополнительные диагностические признаки при последующем установлении для конкретного типоразмера оборудования пороговых значений предельного состояния.

Технологию нанесения WC-TiN целесообразно использовать в ремонтно-восстановительных подразделениях и специализированных организациях, имеющих оборудование для плазменно-порошкового напыления и контроля качества покрытий. Перед промышленным тиражированием необходимо провести ресурсные испытания для конкретной марки материала бандажа, режима дробления и гранулометрического состава питания с уточнением оптимальной толщины слоя и числа циклов восстановления.

Конструктивные решения по сегментированным футеровкам и профилю Рело могут быть использованы проектными и машиностроительными организациями при модернизации валковых дробилок, особенно в случаях, когда лимитирующими факторами являются локальный износ, сложность замены цельного бандажа и высокие пиковые нагрузки на привод. Научное развитие результатов целесообразно продолжить кафедре горного оборудования, транспорта и машиностроения НИТУ МИСИС совместно с профильными коллективами Санкт-Петербургского горного университета в направлениях надежности горных машин, газотермического упрочнения быстроизнашиваемых поверхностей, цифрового мониторинга износа и прогнозирования остаточного ресурса.

7. Замечания и вопросы по работе

1. Ориентируясь на текст диссертации, можно выделить расхождение выбранных терминов, определяемых целью и задачами работы. Если придерживаться строгости в понятийном аппарате, то срок службы и долговечность являются разными терминами надежности оборудования.
2. С учетом цели работы не совсем понятна необходимость обзора эксплуатационных параметров оборудования, таких как производительность и энергоемкость, так как повышение срока службы бандажей валковых дробилок не оказывают прямого влияния на эти параметры. Стоило уделить больше внимания параметрам надежности, в том числе и количественным.
3. Не совсем понятно, для чего выполнено сравнение энергоемкости валковых дробилок с шаровыми и другими мельницами (стр. 40), которые имеют другую область применения и в целом находятся в другой категории оборудования. Необходимость применения мельниц для разрушения вскрышных пород видится нецелесообразным.
4. Было бы интересно увидеть результаты комплексного исследования надежности рассматриваемого оборудования, где при применении упрочняющих покрытий анализировалось бы влияние на ресурс валковых дробилок абразивного и усталостного износа в совокупности.
5. Не совсем понятно упомянутое во второй главе влияние абразивного износа бандажей валков на степень дробления. Насколько значительным является этот процесс применительно к

эффективности дробления вскрышной породы в условиях открытых горных работ. Надо отметить, что далее в работе эти параметры не увязаны.

6. В работе проведен интересный эксперимент (раздел 3.2.3) на абразивный износ образцов с различными покрытиями, но эксперимент проводился для взаимодействия с прямолинейной поверхностью, а также с возможностью охлаждения и смазки трущихся поверхностей. Насколько можно расширить результаты проведенного эксперимента на бандажные элементы цилиндрических и других форм при взаимодействии с кусками горной породы произвольной формы.

7. Автором применен новый интересный метод оценки целостности исследуемого объекта при помощи 3d-сканера, но применение данного метода на современном уровне может дать существенную погрешность в измерениях, а значит и в результатах.

8. Хотелось бы более подробного описания результатов экспериментальных исследований, приведенных в главе 4, например, как учтены результаты износа для практических рекомендаций применительно к повышению долговечности бандажей валковых дробилок.

9. Имеется ряд замечаний редакционного характера: пунктуации (стр. 59), опечаток, неточностей, несогласованных предложений (стр. 71), отсутствие расшифровок аббревиатур (например, СЭМ) и величин измерения, например, времени наработки (рис. 4.1, 4.2).

Отмеченные замечания носят уточняющий и рекомендательный характер, не затрагивают существа полученных научных результатов, не ставят под сомнение их достоверность и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

8. Заключение по диссертации

Диссертационная работа Ефимова Дениса Александровича «Повышение долговечности бандажей валковой дробилки карьерного дробильно-сортировочного комплекса с учетом процессов их абразивного изнашивания» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основе комплекса теоретических, экспериментальных и расчетных исследований решена актуальная научно-техническая задача повышения долговечности рабочих органов валковых дробилок за счет учета стадийной эволюции поверхностного слоя, применения упрочняющих покрытий и модернизации конструкции футеровочных бандажей.

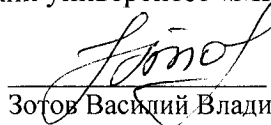
Совокупность полученных результатов обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью. Автором разработана математическая модель локального абразивного изнашивания с учетом параметров микрогеометрии поверхности и накопления повреждений, экспериментально установлена стадийность упрочнения и деградации, обоснована эффективность покрытия WC-TiN и предложены конструктивные решения по сегментированным футеровкам и профилю Рело. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях, защищены патентом и прошли апробацию.

Диссертация «Повышение долговечности бандажей валковой дробилки карьерного дробильно-сортировочного комплекса с учетом процессов их абразивного изнашивания», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины, полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм., а ее автор, Ефимов Денис Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации Ефимова Дениса Александровича обсужден и утвержден на заседании кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», протокол № __1__ от « 02 » сентября 2026 г.

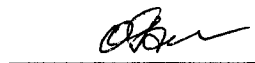
Председатель заседания

И.о. заведующего кафедрой горного оборудования,
транспорта и машиностроения НИТУ МИСИС,
кандидат технических наук


Зотов Василий Владимирович

Секретарь заседания

доцент к.т.н., доцент _____


Белянкина Ольга Владимировна

Подлинность оригинальных подписей подтверждается должностным лицом организации, подписи заверяются печатью.

Подпись Зотова В.В. и Белянкиной О.В. заверяю
М.П. _____

Сведения о ведущей организации:

Полное наименование: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Структурное подразделение: кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения.

Юридический и фактический адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1.

Официальный сайт: <https://misis.ru/>

Электронная почта канцелярии: kancela@misis.ru.

Телефон: +7 (495) 955-00-32.

В.А. ПЕТРОВ