

*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*

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

Санкт-Петербург – 2026

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Господариков Александр Петрович*

**Официальные оппоненты:**

*Лагунова Юлия Андреевна*

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

*Зверев Валерий Юрьевич*

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», доцент.

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

Защита диссертации состоится **18 сентября 2026 г. в 9:45** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 17 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ  
Евгений Ростиславович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 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 Протоdjяконову составляет  $f = 6–12$ , объемная масса — 2,4–2,7 т/м<sup>3</sup>. 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 карьер-

ерных 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 бандажа.

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) 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.).

**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, 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение, зарегистрирована 1 заявка на изобретение.

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

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены степень разработанности проблемы, объект и предмет исследования, сформулированы цель, идея и задачи работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния проблемы повышения ресурса футеровочных бандажей валковых дробилок, работающих в составе карьерных дробильно-сортировочных комплексов. Рассмотрены конструктивные особенности валковых дробилок и условия их эксплуатации при переработке высокоабразивных материалов. Приведена геолого-технологическая характеристика Экибастузского угольного бассейна и условий эксплуатации дробильного оборудования фирмы TAKRAF на разрезе «Восточный». Проанализированы существующие конструктивно-технологические методы повышения долговечности футеровок и сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрены эксплуатационные показатели валковых дробилок и теоретические основы процесса изнашивания футеровочных бандажей. Проанализированы механизмы абразив-

ного и усталостного изнашивания, а также классические энергетические и контактно-механические модели. Показаны ограничения применения рассмотренных моделей для описания реальных условий эксплуатации валковых дробилок в составе карьерных дробильно-сортировочных комплексов и обоснована необходимость учёта стадийного характера изнашивания и эволюции состояния поверхностного слоя.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментально-аналитических исследований абразивного изнашивания футеровочных бандажей. Полученные экспериментальные результаты использованы для анализа износа и подтверждения стадийного характера процесса изнашивания.

**В четвёртой главе** разработана и обоснована математическая модель абразивного изнашивания футеровочных бандажей, учитывающая стадийность процесса, эволюцию микрогеометрии поверхности и накопление усталостных повреждений. Выполнена верификация модели по результатам экспериментальных исследований. Обоснована эффективность применения упрочняющих покрытий на основе WC–TiN, а также модернизацией конструкции бандажей за счет применения профиля Рело и сегментированных футеровок.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам выполненных исследований и приведены рекомендации по практическому применению полученных научных результатов.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**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.**

В работе разработана и подтверждена математическая модель локального абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок в карьерных дробильно-сортировочных комплексов (рисунок 1).

В качестве базового соотношения принята контактно-энергетическая теория Арчарда–Рэя–Хрущёва для локальной величины износа  $W(x,y,t)$ .

Установлено, что деградация состояния поверхности футеровочных бандажей сопровождается увеличением энергетических затрат: пиковая мощность привода валковой дробилки 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.

Показано, что процесс абразивного изнашивания футеровочных бандажей не является строго линейным во времени и зависит от эволюции микрогеометрии поверхности в процессе эксплуатации (рисунок 2). Рост глубины впадин и разрушение несущей части профиля приводят к повышению концентрации контактных напряжений и интенсификации микрорывкрашивания, а также к возникновению пластических деформаций поверхностного слоя (рисунок 3).

Для учёта данного эффекта в модель введён коэффициент накопления усталости  $\beta(t)$ , определяемый на основе параметров опорной кривой Эбботта–Файрстоуна, (1):

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

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

С учетом формулы (1) 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 футеровки, тогда уточнённое уравнение для локальной величины износа  $W(x,y,t)$  принимает вид (2):

$$dW(x,y,t)=k \frac{p(x,y,t)}{H(x,y,t)} \vartheta(x,y,t) \beta(t) dt. \quad (2)$$

Экспериментально установлены и аппроксимированы зависимости параметров кривых Эбботта–Файрстоуна от времени эксплуатации, показывающие закономерные изменения структуры поверхности банджа при переходе от стадии приработки к стадии деградации наклёпанного слоя. В таблице 1 приведены экспериментальные значения параметров, характеризующих эволюцию микрогеометрии поверхности в процессе эксплуатации.

Интегральный показатель деградации микрогеометрии  $\Phi(t)$  аппроксимирован полиномом третьей степени (3):

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

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

По результатам дискретной процедуры численного интегрирования уравнения (2), получена экспериментальная зависимость интенсивности износа  $W(t)$  от времени эксплуатации (рисунок 4), аппроксимированная также полиномом третьей степени (4):

$$W(t) = 2 \cdot 10^{-9} t^3 - 3 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0052 t - 0,0416, \quad R^2 = 0,9966, \quad (4)$$

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

Комплекс применённых экспериментальных методов дополнен трёхмерным сканированием поверхностей для количественной диагностики износа футеровок валков и оценки пространственной неравномерности деградации (рисунок 5).

Морфологический анализ поверхности (сканирующая электронная, оптическая, атомно-силовая микроскопия) по сериям опытов в диапазонах наработки 10–50; 80–180; 250–450; 600–900; 1100–1600 ч подтвердил эволюцию состояния поверхности от исходного и приработанного состояния к формированию дефектного слоя (см. рисунок 2).

Стадийность процесса изнашивания обоснована изменениями твёрдости  $HV_{10}$  и микротвёрдости  $HV_{0,1}$  поверхностного слоя (таблица 2, рисунок 6).

Таблица 2 – Стадийность процесса изнашивания от времени наработки

Пара	Диапазон времени наработки, ч	Стадия	HV <sub>10</sub>	HV <sub>0,1</sub>
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

Для количественной оценки наклёпа введены коэффициенты наклёпа. Численные значения коэффициентов наклёпа составлены: по твёрдости  $K_n = \{1,00; 1,17; 1,33; 1,17; 1,00\}$  и 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. На графиках (рисунок 6) твёрдости выделен максимум наклёпа, соответствующий наработке порядка 645 ч, после которого фиксируется начало снижения твёрдости и рост доли усталостного разрушения упрочнённого слоя. Для описания перехода от стадии приработки и наклёпа к стадии деградации упрочнённого слоя введён коэффициент  $\alpha(\tau)$  с использованием функции Хевисайда  $u(\tau-1)$  ( $\tau$  - нормированное время эксплуатации) (5):

$$\alpha(\tau) = (\tau-1) u(\tau-1), \quad (5)$$

и эквивалентной нормированной формы, определяемой по данным твёрдости (6):

$$\alpha(\tau) = \frac{H_{\max} - HV_{10}(\tau)}{H_{\max} - H_0} u(\tau-1) = \frac{H_{\mu\max} - HV_{0,1}(\tau)}{H_{\mu\max} - H_{\mu 0}} u(\tau-1), \quad (6)$$

где  $H_{\max}$  и  $H_{\mu\max}$  — максимальные значения твёрдости и микротвёрдости поверхностного слоя, а  $H_0$  и  $H_{\mu 0}$  их исходные значения, соответственно;

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 наклёпанного 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 7).

Стадия приработки и наклёпа характеризуется ростом  $HV_{10}/HV_{0,1}$ ; уменьшением доли активных пиков и формированием плато-поверхности с ростом опорной площади (динамика  $Mr_2$ ); стадия деградации характеризуется ростом кавернообразования (динамика  $R_{vk}$ ,  $R_{vk}/R_k$ ,  $\Phi(t)$ ), формированием вторичных микровыступов (рост  $R_{pk}$ ,  $R_{pk}/R_k$  на поздних сроках); нарастанием неравномерности геометрии по данным 3D-сканирования и включением усталостного механизма, зависящего от коэффициента  $\alpha(\tau)$ .

**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.**

Экспериментальные исследования показали, что плазменно-порошковое напыление покрытий (рисунок 8) на основе WC-TiN приводит к формированию упрочнённого поверхностного слоя толщиной до 2,3 мм.

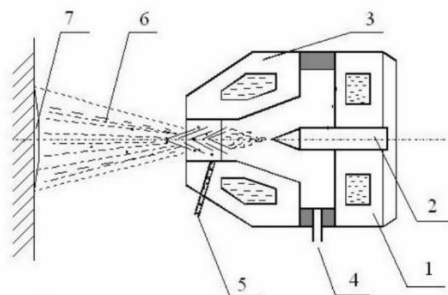


Рисунок 8 – Технология нанесения покрытия методом плазменного напыления (1 – корпус плазмотрона; 2 – катод (вольфрамовый электрод); 3 – катод (охлаждаемое сопло); 4 – канал подачи плазмообразующего газа; 5 – инжектор для подачи порошка; 7 – подложка (напыляемая поверхность))

Микроструктурным анализом (сканирующей электронной микроскопией и сканирующей зондовой микроскопией) установлено отсутствие адгезионных дефектов и расслоений на поверхности образцов (рисунок 9).

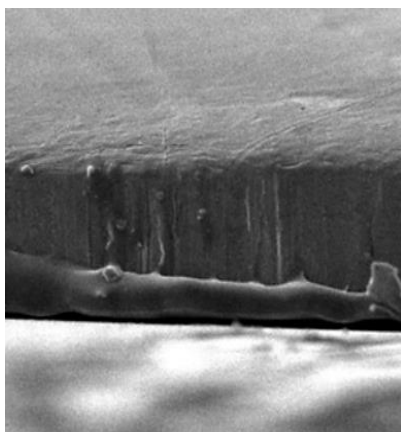


Рисунок 9 – Микроструктурный анализ напыленного слоя WC-TiN

Методом 3D сканирования подтверждена однородность напыленного слоя (рисунок 10). На рисунке 11 приведены зависимости изменения твёрдости ( $HV_{10}$ ) 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  $HV_{10}$  для образцов с напыленным покрытием сохранялся около 280–290 кгс/мм<sup>2</sup>, при пиковых значениях  $HV_{0,1}$  до 330–350 кгс/мм<sup>2</sup>, тогда как у образцов без покрытия – 210–220 и 250–270 кгс/мм<sup>2</sup>, соответственно. Это подтверждает устойчивое упрочнение наклёпанного слоя: прирост твердости составляет около 24–33 % ( $HV_{10}$ ) и 20–25 % ( $HV_{0,1}$ ) по сравнению с футеровочными бандажами без упрочненного слоя, что согласуется с полученными значениями коэффициента износа.

Зависимость потери линейного размера образцов  $\Delta l(t)$  от времени испытаний (рисунок 12) при абразивном изнашивании для образцов с упрочнённым покрытием WC–TiN поверхностей и без с высокой точностью аппроксимируются линейными зависимостями, что подтверждается значениями коэффициента детерминации  $R^2 > 0,97$ . Сравнительный анализ угловых коэффициентов аппроксимирующих прямых (рисунок 12) показывает, что для образцов с покрытием характерны их меньшие значения, что соответствует снижению средней скорости изнашивания. Средняя скорость изнашивания упрочнённых образцов на 28–30 % ниже, чем у образцов без напыления WC–TiN.

Анализ кинетики 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 наклёпа и начало интенсивного роста коэффициента усталости  $\alpha(\tau)$  фиксируются при наработке около 645 ч, тогда как для покрытых образцов аналогичный переход наблюдается при наработке порядка 760 ч (рисунок 13).

Дополнительный эффект повышения эксплуатационной эффективности достигается за счёт модернизации конструкции футеровочных бандажей. Предложено техническое решение по применению сегментированной конструкции футеровочных бандажей (рисунок 14) и бандажей с профилем Рело (рисунок 15). В результате достигается уменьшение пиковой мощности привода валковой дробилки на 10–16 % соответственно.

## 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  $645 \text{ кгс/мм}^2$  и стадию усталостной деградации упрочнённого слоя при воздействии переменных физико-механических свойств перерабатываемых материалов.

3. Экспериментально получены количественные зависимости изменения твёрдости  $HV_{10}$  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/мм<sup>2</sup> 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 «ЗД 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 остаточ-

ного ресурса футеровочных бандажей, а также оптимизацией конструктивных решений и упрочняющих покрытий для различных типов перерабатываемых пород.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. 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.

2. 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.

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

3. **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.

4. Господариков, А. П. Исследование процессов абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок 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.

*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

5. 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 государ-

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

6. 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/патенто-обладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 8 с.: ил.

А)



Б)

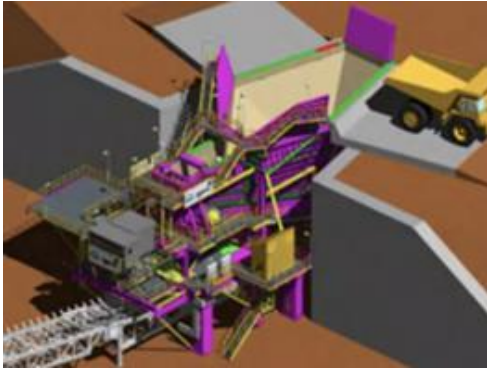


Рисунок 1 – Полумобильная дробильная установка TAKRAF: А) Дробильная установка TAKRAF на разрезе «Восточный»; Б) 3D модель установки

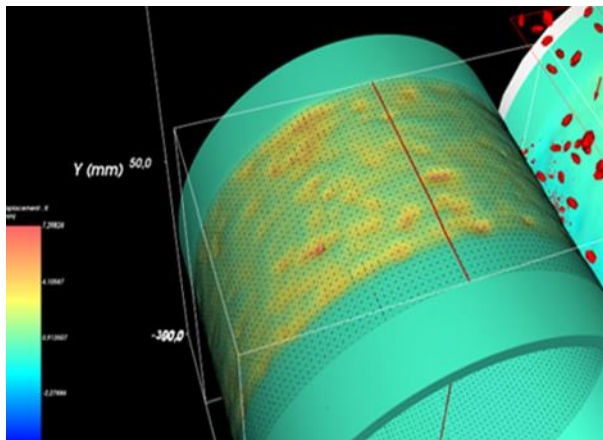


Рисунок 3 – Износ поверхности бандажа

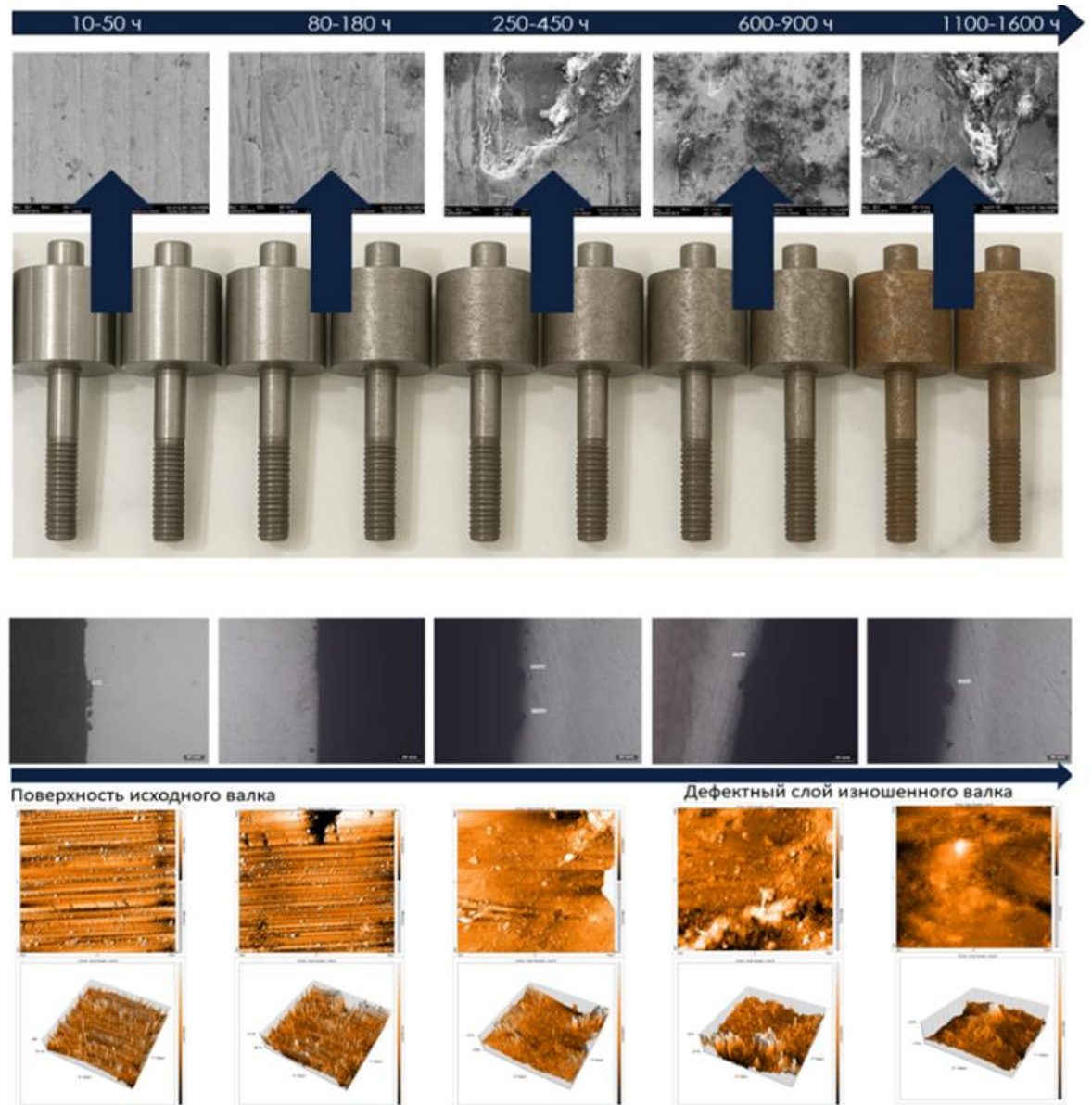
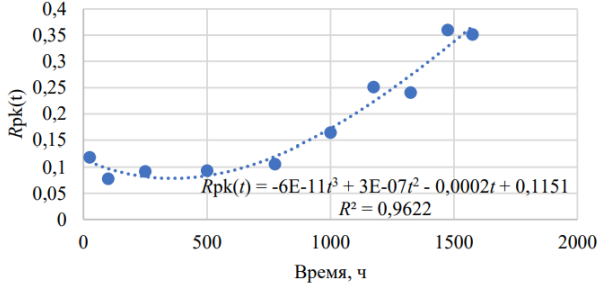
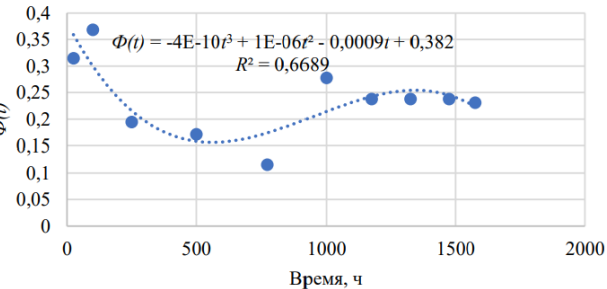
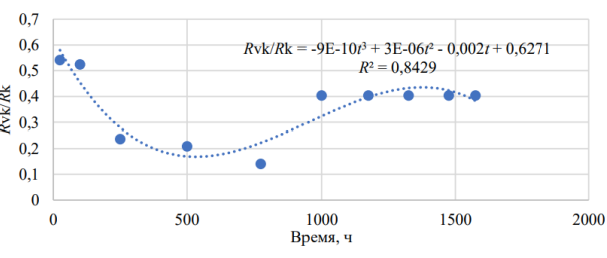
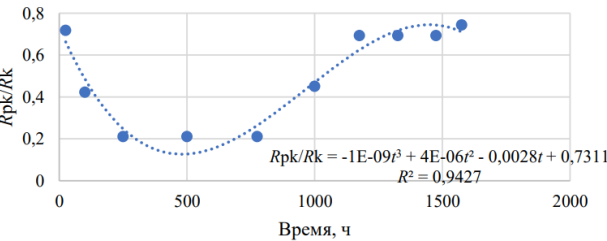


Рисунок 2 – Изменение структуры поверхности бандажа в зависимости от времени наработки

Таблица 1 – Изменение параметров микрогеометрии поверхности бандажа в процессе изнашивания

Параметр	Графическая интерпретация	Описание
$R_{pk}$		<p>Рост параметра <math>R_{pk}</math> на поздних стадиях эксплуатации связан с формированием вторичных микровыступов в результате разрушения упрочнённого слоя и является <i>признаком перехода к усталостно-абразивному механизму изнашивания</i>.</p>
$\Phi(t)$		<p>Параметр <math>\Phi(t)</math> характеризует относительную долю каверн по отношению к несущей части профиля. <i>Минимум <math>\Phi(t)</math> соответствует устойчивому режиму эксплуатации, тогда как рост параметра отражает деградацию поверхностного слоя</i>.</p>
$R_{vk}/R_k$		<p>Зависимость <math>R_{vk}/R_k</math> имеет выраженный минимум, соответствующий зоне сформированного плато-профиля. <i>Рост данного параметра на поздних стадиях эксплуатации обусловлен развитием каверн и углублением впадин вследствие усталостного выкрашивания</i>.</p>
$R_{pk}/R_k$		<p>Безразмерное отношение <math>R_{pk}/R_k</math> характеризует относительную долю активных пиков в профиле поверхности. <i>Минимум данной зависимости соответствует стадии формирования плато-поверхности и максимальной несущей способности, тогда как последующий рост отражает разрушение упрочнённого слоя и формирование вторичных микровыступов</i>.</p>

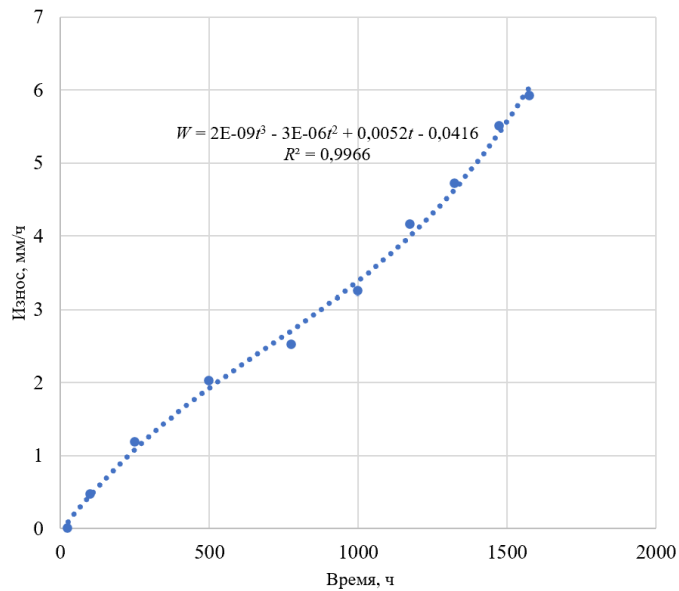


Рисунок 4 – Износ бандажа в зависимости от времени эксплуатации

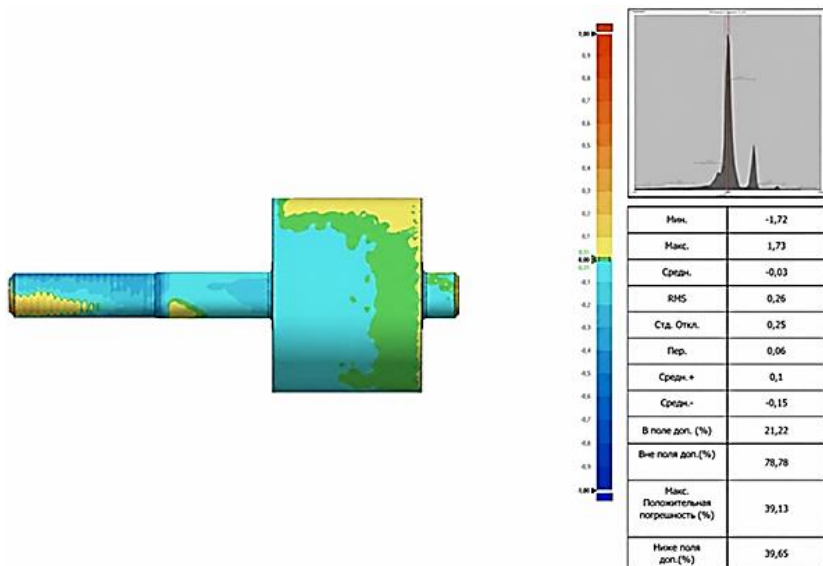


Рисунок 5 – Данные 3D сканирования образца

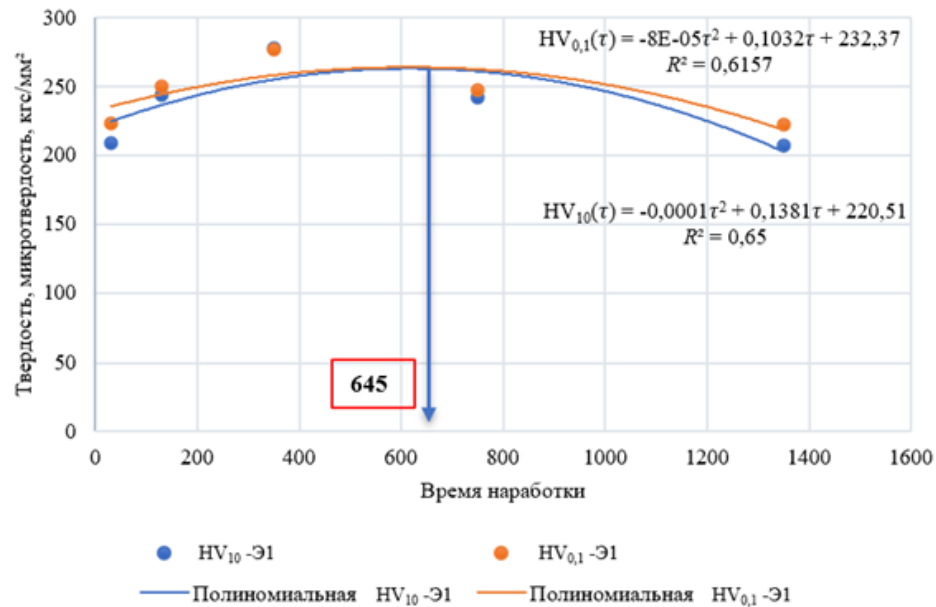


Рисунок 6 – Зависимость твердости (микротвердости) образца от времени наработки

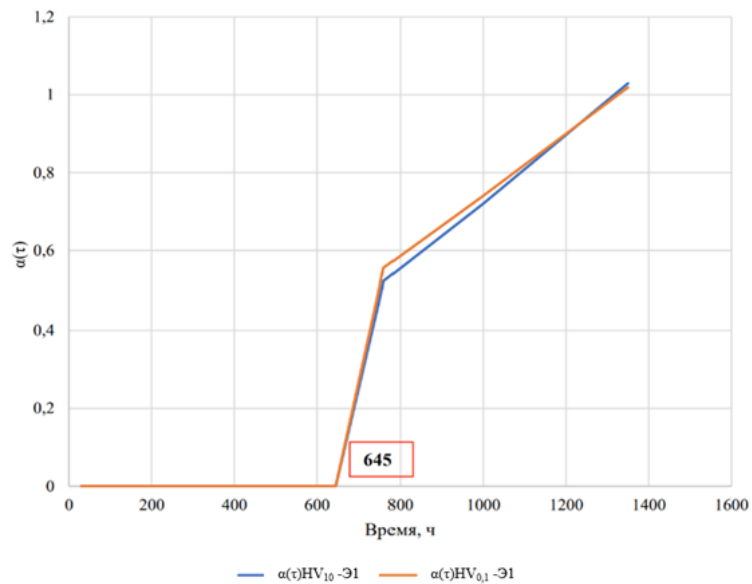


Рисунок 7 – Значение коэффициента усталости  $\alpha(t)$  в зависимости от времени наработки

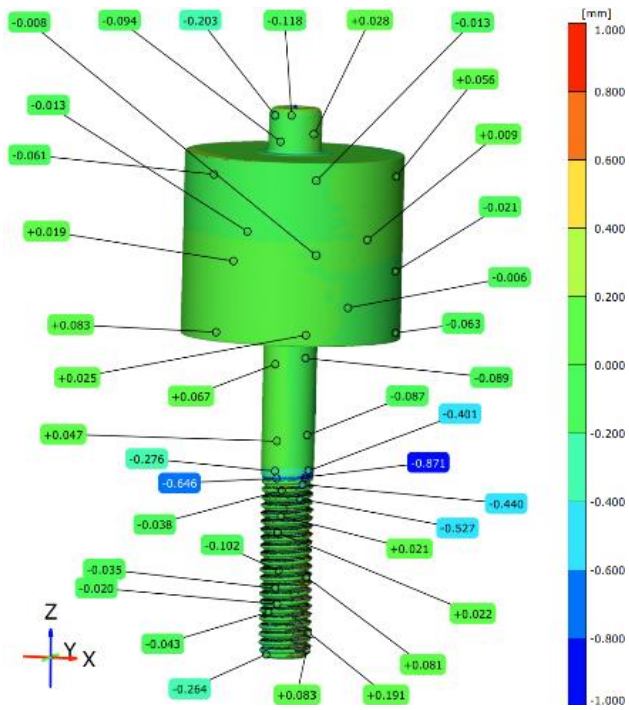


Рисунок 10 – Карта контроля отклонений по поверхности футеровочного бандажа с напыленным слоем

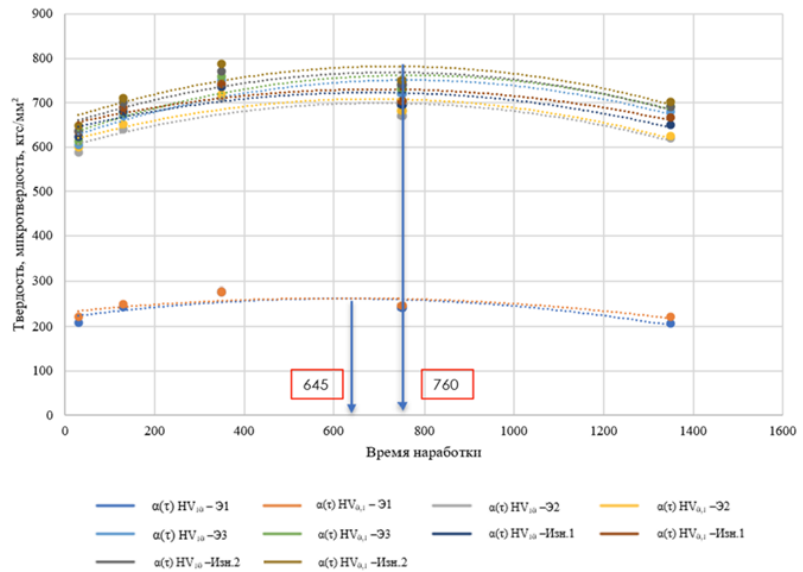


Рисунок 11 – Зависимость твердости (микротвердости) образца от времени наработки для образцов с напылением и без

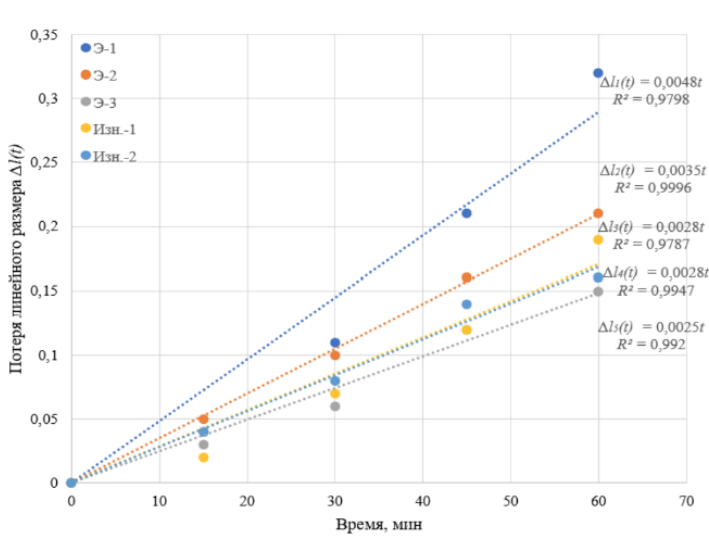


Рисунок 12 – Зависимость потери линейного размера образцов  $\Delta l(t)$  от времени испытаний

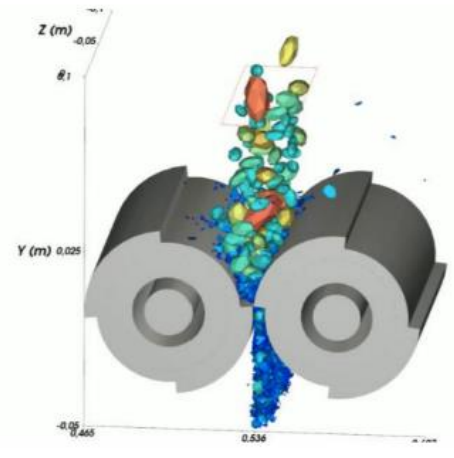


Рисунок 14 – Валковая дробилка с сегментированными футеровочными бандажами

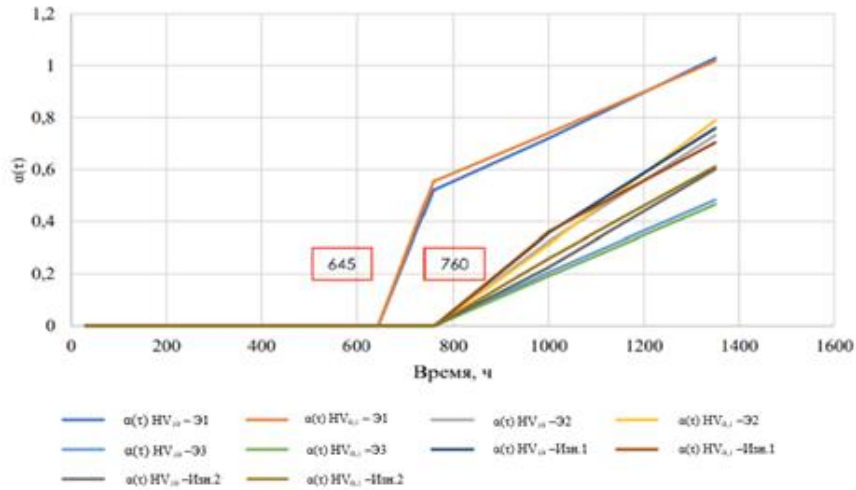


Рисунок 13 – Значение коэффициента усталости  $\alpha(\tau)$  для эталонных образцов и образцов с покрытием в зависимости от времени наработки

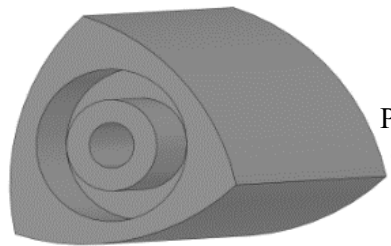


Рисунок 15 – Валковая дробилка с футеровочными бандажами с профилем Рело