ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):5-27
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 62.926.323 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ДРОБЯЩИХ АГРЕГАТОВ И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

А.П. Господариков[1], Д.А. Ефимов[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: s225065@stud.spmi.ru

Аннотация: Изложены результаты исследования абразивного изнашивания цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробилок, являющегося основным фактором снижения эксплуатационного ресурса последних. На основе анализа механизмов изнашивания бандажей футеровок (микропластическая деформация, усталостное разрушение, режущий износ и т.д.) разработана математическая модель, базирующаяся на формуле Арчарда и методике Крагельского и учитывающая параметры контактного давления, скорость скольжения и твердость материала. Экспериментальные данные, полученные при исследовании изношенных и эталонных образцов валков, выявили увеличение твердости (на 33% по HV0) и микротвердости (на 24% по HV0,) материала изношенных поверхностей, что связано с эффектом наклепа. Для снижения процесса изнашивания предложены следующие технологические решения: плазменное напыление карбида вольфрама (WC) и нитрида титана (TiN), повышающее износостойкость материала, а также применение сегментированных футеровочных бандажей, оптимизирующих распределение возникающей нагрузки. Результаты исследований показали, что применение двухслойного плазменного напыления снижает износ на 46% по сравнению с эталонными образцами. Использование 3D-сканирования с учетом результатов математического моделирования позволило выявить зоны максимального износа футеровочных бандажей и прогнозировать срок их службы. Комбинация материалов с улучшенными свойствами и рациональной геометрией бандажей футеровок значительно сокращает эксплуатационные затраты на обслуживание оборудования, позволяет оптимизировать режимы эксплуатации, что приводит к увеличению срока его службы.

Ключевые слова: валковые дробилки, абразивное изнашивание, футеровочные бандажи, плазменное напыление, износостойкость, сегментированные конструкции, 3D-моделирование, карбид вольфрама, нитрид титана.

Для цитирования: *Господариков А. П., Ефимов Д. А.* Исследование процессов абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов и методов повышения их износостойкости // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 5–27. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_5.

© А.П. Господариков, Д.А. Ефимов. 2026.

Abrasive wear of shell linings of roller crushers and the wear resistance increase methods

A.P. Gospodarikov[1], **D.A. Efimov**[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: s225065@stud.spmi.ru

Abstract: The article describes the studies on the abrasive wear of cylindrical shell linings of roller crushers as this type of wear is the prime factor of the in-use life reduction of the equipment. On the basis of the analysis of shell lining wear mechanisms (microplastic deformation, fatigue failure, cutting wear, etc.), the mathematical model is developed using the Archard equation and Kragelsky's method, with regard to the contact pressure, sliding velocity and material hardness. The experimental data on worn and reference models of rollers show the increase in the hardness (by 33% in terms of HV10) and in the microhardness (by 24% in terms ofHV0.1) of the worn surfaces due to the strain hardening effect. The process solutions proposed for the wear reduction include: plasma coating with wolfram carbide (WC) and titanium nitride (TiN), which increases wear resistance, and the use of segmented shell linings, which optimizes load distribution. The studies show that plasma coating reduces wear by 46% as compared with the reference models. 3D scanning and mathematical modeling allow pinpointing the maximum wear zones in shell linings and predicting their service life. By integrating materials with the improved properties with the rational geometry of shell linings, it is possible to reduce the maintenance cost of the equipment and to optimize its operating conditions, which enables extending its service life.

Key words: roller crushers, abrasive wear, shell linings, plasma coating, wear resistance, segmented structures, 3D modeling, wolfram carbide, titanium nitride.

For citation: Gospodarikov A. P., Efimov D. A. Abrasive wear of shell linings of roller crushers and the wear resistance increase methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2):5-27. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_5.

Введение

Валковые дробящие агрегаты (дробилки и мельницы) представляют собой технологически универсальное оборудование, широко применяемое в химической, горнорудной, металлургической, строительной и других отраслях промышленности для измельчения кусковых и сыпучих материалов [1—3]. Их ключевая функция заключается в дроблении сырья до заданных фракций, что определяет качество последующих производственных этапов [4—6] (в частности, в обогатительных операциях — флотации и гравитации [7, 8]). Преимущество данных агрегатов определяется компактностью конструкции, возможностью регулируемости степени измельчения руды, дроблением как хрупких, так и эластичных материалов (включая полимерные и резино-технические), а также простотой эксплуатационного контроля [9—11].

В рудной промышленности валковые дробилки используются для первичного и вторичного дробления рудного и нерудного сырья (антрацита, кокса, электродных заготовок и многих углеродных материалов), играя критическую роль в энергоемких процессах металлургии и химической технологии [9, 10, 12]. Однако основным ограничени-

ем эффективности их применения является интенсивное абразивное изнашивание цилиндрических футеровочных бандажей, обусловленное воздействием высоких контактных напряжений, динамических нагрузок и наличием абразивных частиц. Все это приводит к снижению производительности, увеличению эксплуатационных затрат (включая замену рабочих элементов и существенные простои) и ухудшению качества конечного продукта [1 — 3]. Нестабильная работа дробильного оборудования, вызванная изнашиванием, негативно сказывается на качестве измельченного материала, что имеет критическое значение для многих технологических процессов. Современные требования к снижению издержек и повышению эффективности производства усиливают необходимость разработки инновационных подходов к решению проблемы изнашивания.

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения ресурса валковых дробящих агрегатов и снижения эксплуатационных затрат за счет прогнозирования абразивного износа футеровочных бандажей, который является основным фактором отказов и затрат на обслуживание оборудования.

Цель исследования

Разработка метода повышения долговечности цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов, включающего комплексный подход к расчету и минимизации абразивного износа за счет оптимизации эксплуатационных параметров оборудования и совершенствования конструктивных решений, внедрения технологии упрочнения рабочих поверхностей валков. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- Провести анализ существующих конструкций валковых дробилок, механизмов и закономерностей абразивного изнашивания, выделить факторы, определяющие интенсивность износа футеровочных бандажей.
- Выполнить экспериментальные исследования структуры и свойств поверхности изношенных и эталонных образцов валков (твердость, микротвердость, микроструктура).
- Разработать интегральную математическую модель абразивного износа на основе уравнения Арчарда с учетом распределения контактных нагрузок и коэффициента усталостного накопления повреждений.
- Реализовать верификацию модели по результатам 3D-сканирования валков и лабораторных испытаний образцов.
- Оценить эффективность упрочняющих технологий (например, двухслойного покрытия WC–TiN) и конструктивных решений (сегментированных футеровок) для повышения износостойкости.

Материалы и методы

В 2024 — 2025 гг. на базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II проведены комплексные исследования по изучению абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов. В качестве объектов исследования использовались цилиндрические футеровочные бандажи до и после эксплуатации, а также образцы с нанесенными двухслойными покрытиями WC–TiN.

В процессе выполнения научно-исследовательской работы проведены:

- микроструктурные исследования поверхностей футеровочных бандажей методами оптической и сканирующей электронной микроскопии;
- высокоточное 3D-сканирование поверхности образцов до и после эксплуатации с последующим построением карт геометрических отклонений;
- профилометрический анализ и оценка параметров микрорельефа;

• измерения твердости и микротвердости по методу Виккерса для оценки изменений механических свойств материала при изнашивании;

• абразивные трибоиспытания на лабораторной установке с контролируемыми параметрами нагрузки;

• нанесение покрытий WC–TiN методом плазменного напыления;

• математическое моделирование процессов изнашивания.

Результаты экспериментальных исследований сопоставлялись с расчетными данными, что позволило установить закономерности формирования зон интенсивного износа и оценить эффективность защитных покрытий.

Результаты и их обсуждение

Современные конструкции валковых дробилок, регламентируемые ГОСТ 18266-72, классифицируются по количеству валков (одно-, двух-, трехвалковые) и реализуют способы разрушения материала через раздавливание, раскалывание и истирание, исключая ударные и режущие воздействия [9].

Габаритные параметры валков варьируются от компактных 400×250 мм (ДГ 400×250) до крупногабаритных 1600×2000 мм (ДДЗ 16), что позволяет адаптировать оборудование к требованиям конкретных технологических процессов [1—3].

Среди валковых дробилок доминирующее положение занимают двухвалковые модели, классифицируемые по типу их рабочей поверхности:

• гладкие валки — захватывают материал с максимальным размером комков до 5% от диаметра валка, обеспечивая степень дробления 2—4, с объемной производительностью 65 м^3/ч (модель ДГ 1500×600);

• рифленые валки — обрабатывают фрагменты размером 8—10% от диаметра валка со степенью дробления до 6, с производительностью до 54 м^3/ч (ДГР 600×400);

• зубчатые валки — эффективны для крупных частиц (25—50% от диаметра валка) при степени дробления 3—10, с производительностью до 500 м^3/ч (ДДЗ 16) [9—11].

Итак, согласно ГОСТ 18266-72 «Дробилки валковые с гладкими и рифлеными валками», валковые дробящие агрегаты — это дробилки, в которых материал дробится, сжимается между вращающимися валками или между валком и неподвижной плитой [13]. Под валковыми дробящими агрегатами подразумевается только оборудование, подпадающее под определение ГОСТ 18266-72, в котором разрушение обрабатываемого материала происходит методами раздавливания, раскалывания, излома и стирания (при этом разрушение ударом и срезом для валковых измельчителей не учитывается). В данной работе рассматриваются измельчители с валками, имеющими наружную рабочую поверхность.

Процесс изнашивания рабочих поверхностей валковых дробящих агрегатов является основным фактором, ограничивающим их эксплуатационный ресурс и эффективность работы оборудования. Абразивное изнашивание цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробилок представляет собой сложный процесс, тесно связанный с износом материала рабочих поверхностей в результате их взаимодействия с абразивными частицами. Иллюстрация результатов компьютерного моделирования в программном пакете Rocky DEM представлена на рис. 1. Описание процесса изнашивания материала заключается в том, что твердая поверхность футеровочного бандажа разбивается на элементарные треугольные участки. Тогда эффект удаления необходимого объема материала достигается смещением

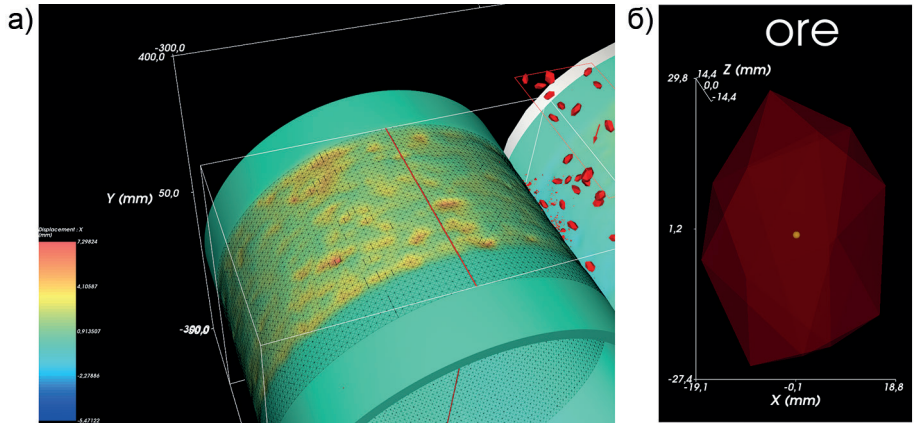

Рис. 1. Износ поверхности футеровочного бандажа: поверхность валка (а); модель частицы руды (б)
Fig. 1. Wear of the lining band surface: surface of the roll (a); model of an ore particle (b)

их вершин внутрь (расстояние, на которое перемещается каждая вершина, определяется из условия изменения объема материала, равного заданному значению [1 – 3]).

Прогнозировать величину абразивного износа твердой рабочей поверхности валка позволяют закон Арчарда и методика Крагельского. Уравнение износа Арчарда — это модель, описывающая износ при скольжении, в рамках теории контакта выступов. По закону Арчарда–Рея–Хрущева объем удаленных частиц в результате износа пропорционален работе, совершаемой силами трения:

$$dV = K\frac{F}{H}ds, \qquad (1)$$

где dV — приращение объема изношенного материала, мм^3; K — безразмерная постоянная; F — общая нормальная нагрузка, Н; ds — элементарный путь скольжения, м; H — твердость самых мягких контактирующих поверхностей, HV. Величина F·s пропорционально работе, совершаемой силами трения, согласно гипотезе Рея [14].

Тогда формула для определения линейной характеристики износа I_h по методике Крагельского [15] (в случае упругого контакта) имеет вид

$$I_h = \frac{0{,}6\left(1-\mu^2\right)\nu^{1/2}q_a}{n\nu\left(\nu^2-1\right)K_2E}, \qquad (2)$$

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

Для случая пластического контакта для I_h справедлива формула [15]

$$I_h = \frac{\left(\frac{\sigma_s+2\tau}{\sigma_s-2\tau}\right)^{\frac{t}{2}}}{\delta^t(HB)^{1+\frac{t+1}{2\nu}}}, \qquad (3)$$

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

Интенсивность изнашивания определяется комплексом факторов, включая физико-механические свойства перерабатываемого материала, параметры контактного взаимодействия, геометрию (микрогеометрию) рабочих поверхностей, а также режимы эксплуатации оборудования.

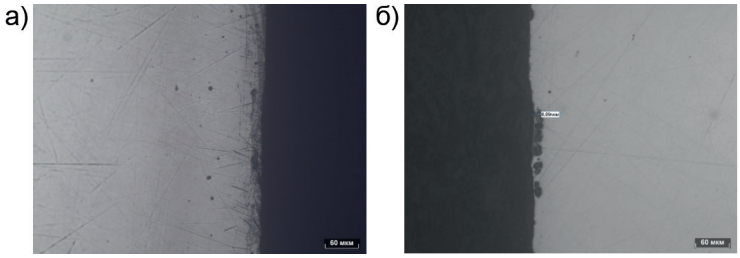

Рис. 2. Изношенная поверхность валка: вдоль (а); поперек (б)
Fig. 2. Worn surface of the roll: along (a); across (b)

Итак, абразивное изнашивание рабочих поверхностей валковых дробящих агрегатов может происходить за счет нескольких механических процессов, включающих режущий износ, пластическую деформацию, механическое разрушение и эрозию. Каждый из них имеет свою специфику и степень воздействия на материал футеровок в зависимости от типа перерабатываемой руды и эксплуатационных условий.

Основные механизмы абразивного изнашивания:

а) микропластическая деформация и резание;

резание — острые абразивные частицы (например, кварц) внедряются в поверхность материала и срезают микростружку под действием касательных напряжений;

плужение — частицы деформируют поверхность, образуя борозды без удаления материала. Смещенный объем накапливается по краям канавок, создавая зоны для последующего усталостного разрушения;

б) усталостное разрушение — многократное циклическое воздействие абразивов приводит к накоплению микротрещин [14, 15];

в) коррозионно-абразивное взаимодействие — абразивы удаляют защитные оксидные пленки, ускоряя химическое разрушение [16, 17].

Для исследования процесса изнашивания валков были получены спилы валков:

образец 1 — изношенный валок (исследование на микротвердость и исследование структуры поверхности (поперек));

образец 2 — изношенный валок (исследование структуры поверхности (вдоль));

образец 3 — изношенный валок (исследование на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ));

образец 4 — эталонный валок (исследования на микротвердость и структуры поверхности (поперек));

образец 5 — эталонный валок (исследование на СЭМ);

образец 6 — эталонный валок (исследование структуры).

Дальнейшее исследование структуры поверхности валков проводилось на образцах № 1, 2, 4, 6 с помощью светового оптического микроскопа Leica DMI 5000 (рис. 2 и 3).

На рис. 2, *а*, *б* приведены макрофотографии поверхности эталонного (неизношенного) цилиндрического бандажа валка. Хорошо заметна ровная геометрия рабочей поверхности, соответствующая требованиям ГОСТ 18266-72 по обеспечению точности размеров и качества обработки.

Поверхность относительно гладкая, без выраженных следов механического воздействия, шероховатость находится в пределах нормы, что подтверждает правильность изготовления и исходную работоспособность валка.

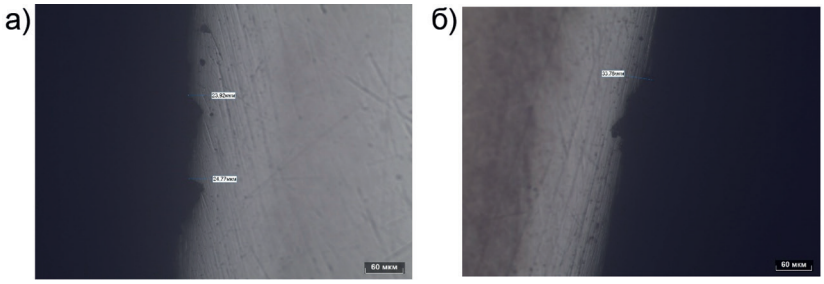

Рис. 3. Исходная поверхность валка: вдоль (а); поперек (б)
Fig. 3. The initial surface of the roll: along (a); across (b)

На рис. 3, *а*, *б* показана поверхность изношенного валка после эксплуатации. На ней четко видны продольные и поперечные борозды, возникшие в результате действия абразивных частиц руды. В ряде зон зафиксированы локальные углубления и трещины. Характер дефектов указывает на преобладание механизмов абразивного резания и плужения, сопровождающихся микропластической деформацией. Сравнение с рис. 2 демонстрирует значительное увеличение шероховатости и потерю исходной геометрии поверхности, что напрямую влияет на эксплуатационные характеристики оборудования.

На образцах № 3 и № 5 проводилось исследование поверхности валков на сканирующем электронном микроскопе Supra 40VP Carl Zeiss (рис. 4, 5). На рис. 4, *а*, *б* приведены микроструктурные изображения эталонного материала бандажа. Видна однородная феррито-перлитная структура с равномерным распределением фаз, отсутствуют зоны наклепа, микротрещины или локальные включения. Согласно результатам измерений по ГОСТ 9012-59 (твердость по Бринеллю) и ГОСТ 2999-75 (микротвердость по Виккерсу), исходная твердость материала составляет 210 — 220 HV10 (табл. 1), что соответствует нормативным значениям для используемой стали.

На рис. 5, *а*, *б* представлена микроструктура поверхности изношенного бандажа. В отличие от эталонного состояния, зафиксированы многочисленные микротрещины, борозды и выбоины, образующиеся при воздействии абразивных частиц. В поверхностных слоях обнаружены зоны локального упрочнения, что подтверждается результатами испытаний: по данным микротвердости, измеренной по ГОСТ 2999-75, значения увеличиваются на 25 — 35% по сравнению с исходным состоянием (см. табл. 1). Наличие дислокационных

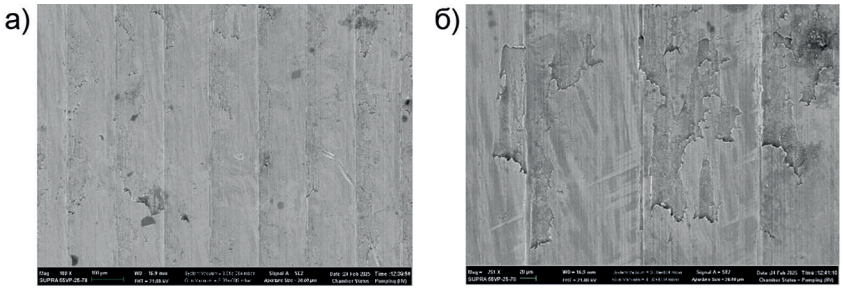

Рис. 4. Поверхность исходного валка: при увеличении 100X (а); при увеличении 251X (б)
Fig. 4. Surface of the initial roll: at 100X magnification (a); at 251X magnification (b)

а) б)

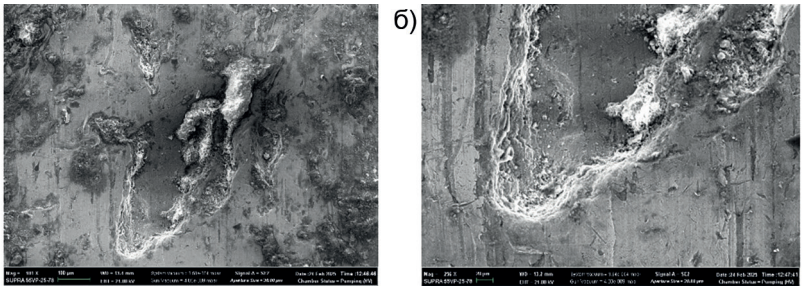

Рис. 5. Поверхность изношенного валка: при увеличении 101X (а); при увеличении 256X (б)
Fig. 5. Surface of a worn roll: at 101X magnification (a); at 256X magnification (b)

скоплений и трещин вдоль границ зерен свидетельствует о действии смешанного механизма износа: абразивного резания и усталостного разрушения. Этот факт учитывается в процессе построения интегральной математической модели (6): для этого вводится коэффициент усталостного накопления, описывающий закономерности изнашивания футеровки во времени.

Рис. 2 — 5 в совокупности показывают переход материала бандажа от исходного состояния (гладкая поверхность, однородная структура) к эксплуатационному (шероховатая поверхность, трещины, наклеп). Полученные данные не только иллюстрируют механизм износа, но и подтверждают правильность выбранной математической модели, основанной на уравнении Арчарда с учетом усталостных процессов.

Для количественного подтверждения выявленных при микроструктурном анализе закономерностей был проведен комплекс измерений твердости материала валков в исходном и изношенном состояниях. Определение твердости осуществлялось по стандартным методикам (ГОСТ 9012-59 и ГОСТ 2999-75) с целью выявления изменений в поверхностных слоях вследствие абразивного воздействия и усталостного разрушения.

Результаты измерений твердости и микротвердости представлены в табл. 1.

Анализ макро- и микроструктурных изображений (см. рис. 2 — 5) в сопоставлении с результатами измерений твердости (см. табл. 1) подтверждает, что абразивный износ сопровождается не только геометрическим изменением рабочей поверхности, но и существенным изменением свойств материала. В поверхностном слое зафиксировано локальное упрочнение за счет наклепа и повышения микротвердости на 25 — 35% относительно эталонного состояния. Одновременно наблюдается развитие микротрещин и зон пластических деформаций, что свидетельствует о комбинированном механизме разрушения —

Таблица 1

Результаты измерений твердости HV10 и микротвердости HV0,1
Results of hardness HV10 and microhardness HV0.1 measurements

№ измерения	Твердость, HV10		Микротвердость, HV0,1	
	исходный валок	изношенный валок	исходный валок	изношенный валок
1	207	277	218	284
2	217	283	223	263
3	203	274	230	284

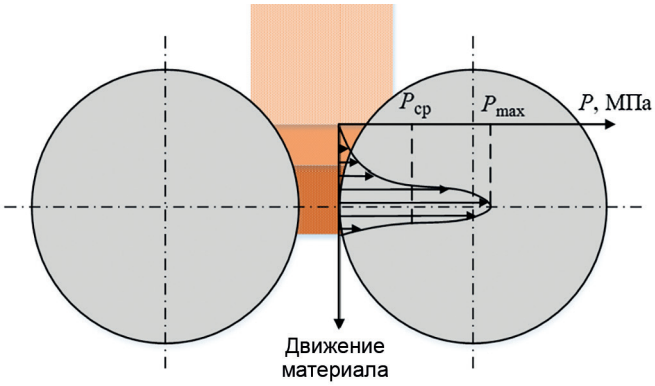

Рис. 6. Эпюра давления в вертикальном разрезе рабочей зоны валкового дробящего агрегата
Fig. 6. Pressure diagram in a vertical section of the working area of a roller crushing unit

абразивного резания и усталостного накопления повреждений.

Установленные закономерности изменения структуры и свойств материала футеровки находят отражение в величине ее фактического износа. Значение последней зависит от многих факторов, как внутренних, так и внешних, которые можно подразделить на три группы:

• Свойства абразива. Твердость абразивных частиц относительно материала футеровочных бандажей играет основную роль: чем больше разница в твердости между абразивом и материалом рабочей поверхности, тем больше износ [15 — 17]. Форма и размеры частиц также оказывают значительное влияние: острые частицы создают более высокие локальные нагрузки, а крупные частицы приводят к повышению значения контактного давления, что ускоряет процесс изнашивания [18, 19].

• Свойства материала футеровочных бандажей. Используемые материалы с высокой твердостью и низкой пластичностью достаточно эффективно сопротивляются абразивному износу футеровок. Например, стальные сплавы с карбидными включениями или композиционные материалы также демонстрируют повышенную стойкость. Наличие специальных структурных компонентов, таких как карбиды или нитриды, дополнительно повышает устойчивость материала футеровки к воздействию абразива. Кроме того, микроструктура материала (мартенситная или аустенитная структура) существенно влияет на его эксплуатационные характеристики [18 — 20].

• Эксплуатационные параметры. Режимы нагружения, скорость вращения валков и распределение контактного давления на рабочей поверхности валков оказывают прямое влияние на их износ. Например, повышенные контактные напряжения вызывают более интенсивное развитие пластических деформаций и микротрещинообразований, что ускоряет разрушение материала. Неравномерное распределение нагрузки на рабочей поверхности валков также увеличивает вероятность локального изнашивания в зонах повышенного давления [1, 12, 21].

Максимальный износ наблюдается в зонах пиковых контактных напряжений (рис. 6). Снижение процесса изнашивания в таких зонах возможно за счет оптимизации геометрии валков, улучшения распределения нагрузки и применения материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками. Современные конструктивные решения, такие как профилированные валки и сегментированные футеровочные бан-

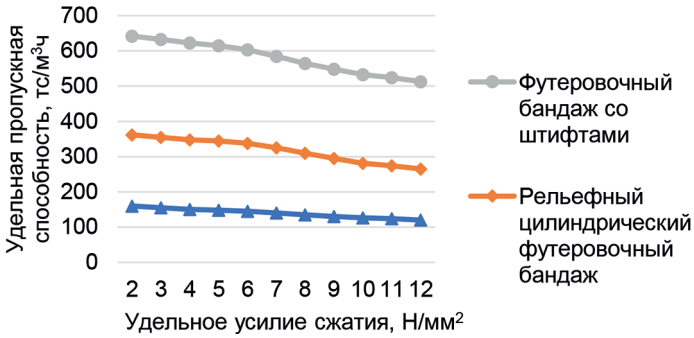

Рис. 7. Влияние типа поверхности футеровочного бандажа на удельную пропускную способность
Fig. 7. Influence of the surface type of the lining bandage on the specific throughput

дажи, позволяют уменьшить локальные напряжения и обеспечить равномерное распределение контактного давления [1].

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, подавляющее влияние на производительность валковых дробящих агрегатов оказывает тип рабочей поверхности футеровочного бандажа (рис. 7).

Влияние шероховатости рабочей поверхности на процесс изнашивания также во многих случаях является значительным. Более гладкие поверхности валков способствуют снижению контактного трения и уменьшению локальных зон высоких напряжений, что замедляет износ рабочих элементов. На поверхности футеровки изношенного валка (рис. 8, *а*) видны выраженные дефекты, следы пластической деформации и углубления, характерные для режущего и усталостного механизмов износа. Поверхность эталонного валка (рис. 8, *б*), напротив, отличается высокой однородностью, отсутствием трещин и выбоин, что указывает на его исходное состояние до начала эксплуатации. Профилограмма изношенного валка (рис. 9, *а*) демонстрирует высокую амплитуду колебаний профиля (в пределах 0,1—1,0 отн. ед.), что свидетельствует о наличии острых выступов и впадин, связанных с локальными разрушениями поверхности. Частое чередование пиков и провалов указывает на наличие короткопериодических флуктуаций, типичных для сильношероховатых поверхностей. В отличие от этого, профилограмма эталонного валка (рис. 9, *б*) показывает относительно низкие колебания профиля в диапазоне 0,3—0,5 отн. ед. Поверхность более сглажена, наблюдается низкая частота флуктуаций, что говорит о высокой начальной чистоте обработки.

Современные методы модификации микротопографии поверхности, такие как лазерная текстуризация, позволяют формировать регулярные микроскопические элементы (ямки, бороздки), которые улучшают удержание смазки, снижают коэффициент трения и замедляют развитие микротрещин. Использование таких микротекстурированных поверхностей способствует значительному увеличению ресурса работы валков и других нагруженных элементов, подверженных абразивному износу [19, 20].

Интенсивность абразивного износа футеровочных бандажей определяется совокупным действием трех групп факторов: свойств материала футеровки,

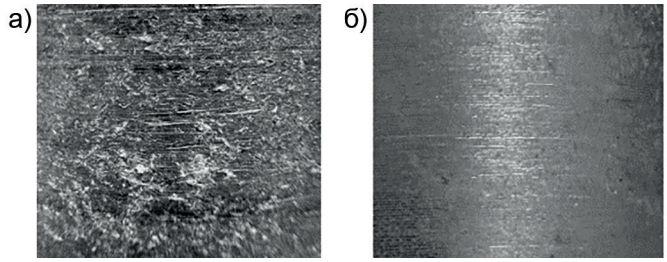

Рис. 8. Поверхность футеровочного бандажа валка: после эксплуатации (а); эталонный образец (б)
Fig. 8. Surface of the roll lining bandage: after operation (a); reference sample (b)

характеристик абразивной среды и условий нагружения. Расчеты и экспериментальные наблюдения (см. рис. 6) показали, что максимальный износ формируется в зонах пиковых контактных напряжений, причем центральные участки футеровки разрушаются быстрее, чем края. Анализ влияния шероховатости (см. рис. 7) выявил, что повышение параметра R_a ускоряет начальную ста-

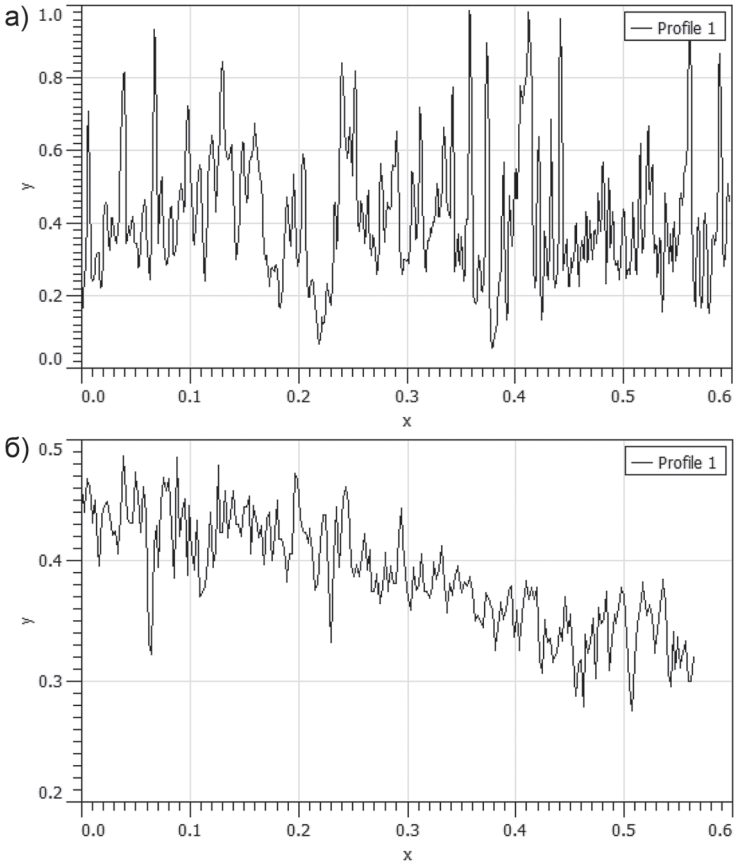

Рис. 9. Поперечная профилограмма футеровочного бандажа валка: после эксплуатации (а); эталонный образец (б)
Fig. 9. Transverse profilogram of the roll lining bandage: after operation (a); reference sample (b)

дию изнашивания за счет увеличения реальной площади контакта и локальной концентрации напряжений, тогда как снижение исходной шероховатости позволяет снизить скорость разрушения. Микроструктурные исследования (см. рис. 8, 9) подтвердили, что износ сопровождается наклепом, повышением твердости на 25—35% и развитием микротрещин, что указывает на комбинированный характер разрушения — совмещение абразивного резания и усталостного накопления повреждений.

Для количественной оценки геометрии изношенной поверхности и построения карт распределения локальных дефектов в работе применялось 3D-сканирование футеровочных бандажей, позволяющее с высокой точностью фиксировать отклонения от эталонной формы и визуализировать зоны интенсивного износа. Трехмерное сканирование применяется для диагностики износа футеровок валков путем анализа изменения (отклонений) их геометрии. Метод основан на создании цифровой 3D-модели поверхности с помощью высокоточного оборудования, например, лазерного сканера AlfaScan, который фиксирует координаты точек, формируя «облако данных». Это позволяет выявить зоны интенсивного износа, сравнить текущее состояние с исходной геометрией и спрогнозировать срок службы элементов. Каждая точка облака характеризуется тремя координатами (*X*, *Y*, *Z*), что позволяет воссоздавать точную модель рабочей поверхности. На основе облака точек строится 3D-модель, которая может быть использована для анализа изменений геометрии рабочей поверхности и оценки степени ее износа.

На этапе непосредственного сканирования с помощью 3D-сканера получают облако точек, представляющее рабочую поверхность валка (рис. 10, *а*).

После сканирования облако точек обрабатывается для создания 3D-модели, включающей фильтрацию данных, удаление шумов и артефактов, а также выравнивание данных, полученных с разных точек сканирования. В результате создается точная цифровая модель рабочей поверхности валка (рис. 10, *б*).

Для оценки изменений геометрии и анализа отклонений между эталонной моделью и текущим состоянием футеровки используется метод карты отклонений. Это позволяет наглядно определить участки с наибольшими отклонениями, которые указывают на более интенсивный износ.

После получения 3D-моделей футеровки до и после эксплуатации можно выполнить сравнение геометрий с помощью вычисления отклонений в каж-

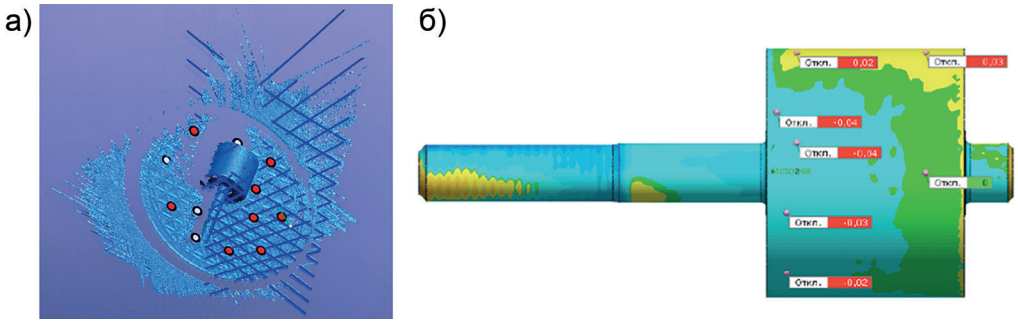

Рис. 10. Диагностика износа футеровки: облако точек (а); цифровая модель рабочей поверхности валка (б)

Fig. 10. Diagnostics of lining wear: point cloud (a); digital model of the roll working surface (b)

дой точке, определяемых как разность между координатами точек эталонной и текущей моделей:

$$\begin{cases} \Delta x = X_{эталон} - X_{текущий} \\ \Delta y = Y_{эталон} - Y_{текущий} \\ \Delta z = Z_{эталон} - Z_{текущий} \end{cases}, \quad (4)$$

где Δx, Δy, Δz — отклонения по координатам; $X_{эталон}$, $Y_{эталон}$, $Z_{эталон}$ — координаты точек эталонной модели; $X_{текущий}$, $Y_{текущий}$, $Z_{текущий}$ — координаты точек текущей модели.

На основе вычисленных отклонений строится карта отклонений. Это может быть цветовое изображение, где каждый цвет соответствует величине отклонения в данной точке:

$$\Delta = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}, \quad (5)$$

где Δ — отклонение; Δx, Δy, Δz — отклонения по трем координатным осям X, Y, Z.

Карта отклонений (рис. 11) позволяет выявить участки футеровки с наибольшими изменениями в геометрии, что указывает на высокие значения износа или концентрацию механических напряжений.

Результаты 3D-сканирования (см. рис. 11) показали выраженную неравномерность износа по ширине цилиндрического бандажа. Максимальные отклонения профиля составили до 3,2 мм в центральной зоне, тогда как в краевых областях они не превышали 0,8—1,0 мм. Среднее значение износа по поверхности валка составило около 1,9 мм, что подтверждает выводы о локализации пиковых контактных напряжений в центральной части рабочей поверхности. Полученные данные демонстрируют, что интенсивность изнашивания распределяется неравномерно: центральные участки (зоны пиковых контактных напряжений) подвергаются ускоренному разрушению, в то время как края сохраняют форму значительно дольше. Эти результаты подтверждают возможность применения интегральной математической модели с учетом распределения контактных нагрузок и позволяют использовать карты отклонений для прогноза ресурса и планирования своевременной замены футеровки. Таким образом, по результатам исследования на рабочей поверхности обнаружены участки с изменением ее формы (отклонениями), указывающие на высокую степень износа, требующую замены или ремонта футеровки.

Полученные натурные данные используются для построения математической модели процесса абразивного изнашивания цилиндрических футеровочных бандажей [22—24].

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

Рис. 11. Карта контроля отклонений
Fig. 11. Deviation Control Map

Разработка математической модели процесса абразивного изнашивания цилиндрических футеровочных бандажей

Шероховатость поверхности R_a играет ключевую роль в процессе абразивного изнашивания футеровки, увеличивая эффективную площадь контакта и значения локальных напряжений: чем выше значение R_a, тем интенсивнее развиваются микропластическая деформация и режущее воздействие абразивных частиц. Амплитуды отклонений точек Δ, отражающие деформации поверхности (вмятины, выпуклости), напрямую влияют на распределение нагрузки. При этом зоны с наибольшими значениями Δ становятся концентраторами напряжений, ускоряя локальный износ. Интегральный анализ позволяет учесть пространственную и временную неоднородность износа, обеспечивая комплексный подход к его прогнозу. Для оценки процесса изнашивания футеровочного бандажа валковой дробилки на первом этапе с помощью 3D-сканирования определяются распределения $R_a(x, y)$ и $\Delta(x, y)$. Затем в программном пакете Ansys Mechanical методом конечных элементов вычисляются контактные силы $F(x, y)$ и скорости скольжения $v(x, y)$ для определения прогноза значения локального износа $W(x, y)$. В результате моделирования определяется карта износа, выделяющая критические зоны (например, участки с $W > 1{,}5$ мм/год), позволяющая своевременно планировать замену футеровок.

Для описания процесса изнашивания валка вводится коэффициент усталости $\beta(t)$, подчиняющийся линейному закону накопления повреждений (правило Пальмгрена–Майнера) и зависящий от накопленных повреждений, что повышает точность прогноза при длительной эксплуатации валковых дробящих агрегатов.

Определим локальную глубину износа $W(x, y, t)$, для этого разделим выражение (1) на площадь элементарной контактной площадки dS, получаем:

$$dW(x,y,t) = K\frac{p(x,y,t)}{H(x,y)}\vartheta(x,y,t)dt\,, \quad (6)$$

где $p(x, y, t)$ — локальное контактное давление; $\vartheta(x, y, t)dt$ — локальный путь скольжения за время dt.

Следует учесть, что процесс абразивного изнашивания не является строго линейным и осложняется дополнительными факторами.

Шероховатость поверхности R_a и амплитуды микронеровностей Δ способствуют концентрации контактных напряжений, что приводит к повышенной интенсивности разрушения поверхностного слоя. Для учета данного эффекта в модель вводятся корректирующие множители $R_a(x, y)$ и $\Delta(x, y)$, масштабирующие интенсивность износа. В процессе эксплуатации наблюдается изменение свойств материала, обусловленное усталостными явлениями [25 — 27]. Для его описания используется коэффициент усталости $\beta(t)$, характеризующий ускорение изнашивания во времени В простейшей линейной аппроксимации:

$$\beta(t) = 1 + \alpha W(x,y,t)\,, \quad (7)$$

где α — эмпирический параметр, определяющий скорость развития усталостных процессов.

Отметим, что данная постановка задачи приводит к интегро-дифференциальному уравнению, решение которого требует специальных математических алгоритмов, знания временных зависимостей нагрузок, скоростей и характеристик контактной поверхности. Подобный подход является затруднительным для практического применения в инженерных расчетах. В этой связи в статье приведено упрощенное выражение, позволяющее выполнять оценки износа в

инженерной практике. Такое приближение фактически соответствует линейному закону Арчарда и позволяет, опираясь на экспериментальные данные, достаточно просто оценивать ресурс работы футеровочных бандажей и сравнивать различные варианты обработки или покрытия:

$$W(x,y,t) = k \cdot \frac{P_{avg} \cdot \vartheta_{avg}}{H_{(x,y)}} \cdot \cdot R_a(x,y) \cdot \Delta(x,y) \cdot t \quad (8)$$

где $P_{avg} = F_{total} / A_{contact}$ — среднее контактное давление (общая сила — F_{total}; площадь контакта — $A_{contact}$t); $\vartheta_{avg} = \omega \cdot R$ — средняя скорость скольжения (угловая скорость ω, радиус валка R); t — время эксплуатации, ч.

Обоснование примененных допущений в уравнении (8):

1) контактное давление P_{avg} определяется равномерным распределением нагрузки по площади контакта. В частности, для цилиндрических валков принята формула

$$A_{contact} = L \cdot b,$$

где L — длина валка, м; b — ширина зоны контакта (определяется деформацией материала), мм;

2) скорость скольжения ϑ_{avg} для вращающихся валков равна

$$\vartheta_{avg} = 2\pi \cdot n \cdot R,$$

где n — частота вращения, об/с [27—29].

Преимущества представленной приближенной математической модели (8) позволяет достаточно точно оценить износ без сложных CFD или FEM-расчетов; учитывает локальные параметры (R_a, Δ), сохраняя при этом информацию о неравномерности износа; может использоваться для сравнения результатов для различных материалов и режимов работы.

Технологические методы упрочнения рабочих поверхностей футеровочных бандажей

Одним из направлений повышения долговечности футеровочных бандажей валковых дробилок является применение методов упрочнения поверхности, в том числе нанесение износостойких покрытий и использование сегментированных конструкций, что позволяет снизить локальные напряжения и обеспечить более равномерное распределение износа.

Плазменное напыление карбида вольфрама (WC) и нитрида титана (TiN) на футеровочные бандажи валковых дробилок является высокоэффективной технологией для улучшения износостойкости и продления срока службы компонентов валкового дробящего агрегата [30—32]. Карбид вольфрама (WC) обладает высокой твердостью и стойкостью к износу, что делает его достаточным для применения в условиях высокой абразивной нагрузки. Напыление WC на футеровочные бандажи значительно повышает их устойчивость к процессу изнашивания при контакте с твердыми рудами. Нитрид титана — это прочное, устойчивое к износу и коррозии покрытие, которое также широко используется для улучшения поверхностей деталей, подвергающихся интенсивному механическому и термическому воздействию [31, 33]. Напыление TiN на бандажи валковых дробилок может повысить их сцепление с рудой, а также увеличить сопротивление процессу изнашивания при высоких температурах [34—36].

Совмещение двух покрытий, таких как карбид вольфрама и нитрид титана, может обеспечить еще более высокие эксплуатационные характеристики бандажей. Создание многослойного покрытия, где один слой будет обеспечивать повышенную износостойкость (WC),

Таблица 2

Результаты абразивных испытаний образцов
Results of abrasive test of samples

Маркировка образца	Наплавка	Толщина слоя наплавления, мм	Маркировка стали вала	Микротвердость, HV10
Э-1[1]	—	—	Сталь 45Х[3]	207
Э-2	Двухслойная WC-TiN	1,3 — 1,4	Сталь 45Х	587
Э-3	Двухслойная WC-TiN	2,1 — 2,3	Сталь 45Х	605
Изн.-1[2]	Двухслойная WC-TiN	1,3 — 1,4	Сталь 45Х	623
Изн.-2	Двухслойная WC-TiN	2,1 — 2,3	Сталь 45Х	874

[1] Э-1,2,3 — эталонный образец. [2] Изн.-1,2 — изношенный образец. [3] Сталь 45Х по ГОСТ4543-71.

Таблица 3

Результаты абразивных испытаний образцов
Results of abrasive test of samples

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	62,80	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

Таблица 4

Рассчитанные величины износа
Calculated wear values

Маркировка образца	Общий износ образца за время испытания 60 мин, мм	Износ образца (мм) в течение времени испытания (мин)			
		0—15	15—30	30—45	45—60
Э-1	0,32	0,04	0,07	0,10	0,11
Э-2	0,21	0,05	0,05	0,06	0,05
Э-3	0,15	0,03	0,03	0,06	0,03
Изн.-1	0,19	0,02	0,05	0,05	0,07
Изн.-2	0,16	0,04	0,04	0,06	0,02

а другой — улучшать антифрикционные свойства и устойчивость к коррозии (TiN), обеспечивает повышение износостойкости и эксплуатационной надежности бандажей.

Для исследований оценки износостойкости изношенной поверхности валка с покрытием (восстановленная геометрия поверхности путем наплавки) и эталонного валка использовалась машина трения для абразивных испытаний. Результаты экспериментов сведены в табл. 2 — 4. На начальном этапе (0 — 15 мин) износ минимален (0,02 — 0,04 мм),

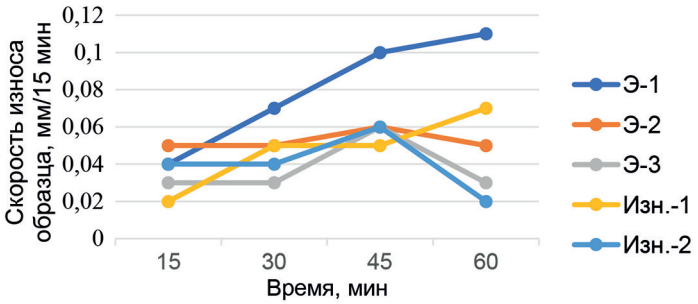

Рис. 12. Зависимость скорости износа образцов от времени испытания
Fig. 12. Dependence of the wear rate of samples on the test time

что связано с приработкой поверхности; критический интервал (45 — 60 мин) — увеличение значения износа за счет разрушения верхнего слоя покрытия. Образцы сохраняют равномерный износ (0,02 — 0,04 мм/15 мин), что указывает на устойчивость наплавленного покрытия (рис. 12).

Образцы с двухслойным покрытием WC–TiN показывают минимальный износ — порядка 0,16 мм за 60 мин (на ~46% меньше, чем у эталонного образца без покрытия). Увеличение толщины слоя снижает износ на 30 — 40%. Эталонные образцы без покрытия имеют износ 0,30 — 032 мм, что в 2 раза выше, чем образцы с защитным покрытием. Применение плазменного напыления карбида вольфрама и нитрида титана значительно повышает эффективность работы валковых дробилок, что особенно важно при переработке абразивных материалов.

Преимущества применения плазменного напыления для валковых дробилок: увеличение срока службы — улучшенная износостойкость и термостойкость; снижение затрат на обслуживание — уменьшение частоты замены футеровок и ремонта; повышение производительности — минимизация деформаций и поломок оборудования; универсальность (возможность наносить покрытия на различные материалы и детали).

Пример реализации технического решения

Анализ трех групп факторов износа, результаты 3D-сканирования и экспериментальные исследования показали, что максимальный абразивный износ футеровочных бандажей развивается в пиковых зонах контактных напряжений, расположенных в центральной части рабочей поверхности валков. Именно в этих областях формируются глубокие борозды, ускоряется процесс усталостного разрушения и наблюдается преждевременная потеря работоспособности футеровки. Учет последних обосновывает необходимость перехода от традиционной монолитной конструкции к новому подходу, заключающемуся в локальном упрочнении и рациональной сегментации футеровки. Научная новизна решения заключается в том, что авторское изобретение предусматривает конструктивное перераспределение нагрузок и возможность замены отдельных сегментов, что позволяет повысить ресурс оборудования и снизить эксплуатационные затраты за счет устранения наиболее изнашиваемых пиковых зон.

Согласно патенту на изобретение RU 2 831 453 C1 [37] предлагается следующее устройство вала и бандажа (см. рис. 13): вал *1* установлен с возможностью вращения, при этом на нем установлены сегментированные цилиндри-

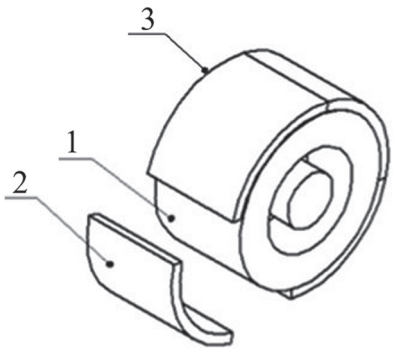

Рис. 13. Вал с сегментированным футеровочным бандажом
Fig. 13. Shaft with a segmented lining bandage

ческие футеровочные бандажи меньшей толщины *2* и сегментированные цилиндрические футеровочные бандажи большей толщины *3*. Цилиндрические футеровочные бандажи состоят из четырех сегментов, из которых толщина двух диаметрально противоположных бандажей *3* в два раза больше толщины бандажей *2*.

Преимущества предложенной конструкции определяется следующими параметрами:

• оптимизация распределения нагрузки: два диаметрально противоположных бандажа большей толщины *3* обеспечивают повышенную прочность в зонах максимального контактного давления. Бандажи меньшей толщины снижают общий вес конструкции и минимизируют локальные напряжения в менее нагруженных областях;

• повышение ремонтопригодности: сегментированная конструкция упрощает замену изношенных элементов без демонтажа всего вала, сокращая время простоя оборудования;

• снижение процесса 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;

• адаптивность к условиям эксплуатации: конструкция позволяет варьировать толщину и количество сегментов в зависимости от типа перерабатываемого материала.

Выводы

1. Установлено, что абразивный износ футеровочных бандажей валковых дробилок развивается неравномерно и определяется совокупным действием трех групп факторов: свойств материала футеровки, характеристик абразивной среды и условий нагружения. Наибольшая интенсивность разрушения фиксируется в пиковых зонах контактных напряжений, преимущественно в центральной части рабочей поверхности валков.

2. Микроструктурный анализ и испытания твердости показали, что эксплуатация сопровождается наклепом и упрочнением поверхностного слоя: твердость увеличивается на 25—35% по сравнению с исходным состоянием. Одновременно развиваются микротрещины и зоны пластической деформации, что указывает на комбинированный механизм разрушения — абразивное резание и усталостное накопление повреждений.

3. Разработана математическая модель износа, основанная на законе Арчарда и дополненная коэффициентом усталостного накопления. В отличие от классических линейных уравнений, модель учитывает нелинейный рост износа во времени и неравномерность нагрузок, что повышает достоверность прогнозирования ресурса футеровок.

4. Методы 3D-сканирования позволили построить карты отклонений профиля бандажей и выявить зоны максимального износа (до 3,2 мм в центральной части при среднем значении около

1,9 мм). Эти данные подтвердили результаты моделирования и экспериментальных наблюдений.

5. Применение плазменного двухслойного покрытия WC–TiN обеспечивает увеличение твердости поверхностного слоя до 870—880 HV10 и снижение глубины износа на ~46% по сравнению с эталонными образцами. Сегментированные конструкции футеровок способствуют перераспределению нагрузок и позволяют локализовать износ в заменяемых сегментах.

6. Внедрение предложенного подхода — совмещение математического моделирования, 3D-сканирования, методов упрочнения и конструктивной оптимизации — позволяет существенно повысить ресурс и надежность валковых дробилок, что имеет высокую практическую значимость для горнодобывающих и перерабатывающих предприятий.

Результаты исследования перспективны для оптимизации технико-технологических характеристик валковых дробилок, включая разработку адаптивных систем контроля величины их износа и внедрение композитных материалов с повышенной износостойкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов Д. А.*, *Господариков А. П.* Технико-технологические аспекты использования валков с профилем в форме треугольника Рело в дробящих агрегатах на рудоподготовительном переделе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10-2. — С. 117—126. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_117.

2. *Матвеев А. И.*, *Лебедев И. Ф.*, *Винокуров В. Р.*, *Львов Е. С.* Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 613—622. DOI: 10.31897/PM1.2022.90.

3. *Дворников Л. Т.*, *Макаров А. В.*, *Комилов Д. С.* Кинематическое исследование щековой дробилки с двумя подвижными щеками // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. — 2019. — № 2(28). — С. 22—24.

4. *Митрофанова Г. В.*, *Черноусенко Е. В.*, *Каменева Ю. С.* О флотационной активности реагентов с нитрильной группировкой при флотации медно-никелевых руд // Обогащение руд. — 2022. — № 6. — С. 13—19. DOI: 10.17580/or.2022.06.03.

5. *Aleksandrova T., Afanasova A., Nikolaeva N., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E.* Investigation of the possibility of obtaining high-purity carbon materials and recovering valuable metals from shungite rocks // Minerals. 2025, vol. 15, article 90. DOI: 10.3390/min15010090.

6. *Popov O., Talovina I., Lieberwirth H., Duriagina A.* Quantitative microstructural analysis and X-ray computed tomography of ores and rocks — Comparison of results // Minerals. 2020, vol. 10, no. 2, article 129. DOI: 10.3390/min10020129.

7. *Пелевин А. Е.* Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 579—592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.

8. *Bazin C., Boulanger J-F.* Investigation of the flotation of an ore containing bastnaesite and monazite: Kinetic study and process flowsheet simulation // Minerals. 2024, vol. 14, no. 9, article 906. DOI: 10.3390/min14090906.

9. *Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Колодежная Е. В., Кутлубаев И. М.* Адаптация валковой дробилки к переработке техногенного сырья // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2024. — № 3. — С. 175—191.

10. *Кривов Д. А.* Механизмы разрушения растительного сырья в валковой дробилке с наборными пластинами в форме РК-профиля // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2024. — № 6(207). — С. 198—205. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-6-198-205.

11. *Кондрахин В. П.*, *Конюхов В. Ю.*, *Полякова А. С.*, *Моисеева Е. Е.*, *Бойко А. А.* Расчет оптимальных параметров валковой дробилки для дробления породы // Горный информационно-

аналитический бюллетень. — 2023. — № 11-1. — С. 88—101. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_88.

12. *Шишкин Е. В.*, *Казаков С. В.* Энергоэффективные устройства для дезинтеграции особо прочных материалов // Горный журнал. — 2021. — № 11. — С. 53—59. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.07.

13. *Власенко Д. А.* Аналитический способ определения энергосиловых параметров процесса измельчения в валковых дробилках с рифленой поверхностью бандажей // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. — 2020. — № 63. — С. 93—101.

14. *Mukras S. M. S.* Computer simulation/prediction of wear in mechanical components // Advances in tribology, 2020. DOI: 10.1155/2020/8867351.

15. *Зобова А. А.* Обзор моделей распределенного сухого трения // Прикладная математика и механика. — 2016. — Т. 80. — № 2. — С. 194—206. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2016.06.008.

16. *Троицкий В. М.* Прогноз абразивного износа с помощью математического моделирования // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов. — 2023. — С. 479—483.

17. *Зоренко Д. А.* Современные представления о механизмах изнашивания подвижных элементов узлов трения // Механика. — 2022. — № 15. — С. 22—29.

18. *Гордеев Ю. И.*, *Бинчуров А. С.*, *Вакулин М. С.*, *Усевич Н. И.*, *Казаков И. С.* Модернизация конструкции рабочих органов валковой дробилки // Решетневские чтения. — 2022. — С. 546—548.

19. *Пожидаев Ю. А.*, *Потапов В. Я.*, *Потапов В. В.*, *Кузнецов А. М.*, *Соколова А. В.* Оптимизация амплитудно-частотной характеристики подвижного элемента валковой дробилки / Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Математическое моделирование механических явлений» (памяти доцента Г.Э. Вебера). — Екатеринбург: УГГУ, 2023. — С. 101.

20. *Жильцов А. П.*, *Власенко Д. А.*, *Харитоненко А. А.*, *Бочаров А. В.*, *Козенко Н. Е.* Анализ и совершенствование конструктивно-технологических параметров дробилок агломерационной шихты и агломерата // Вестник Липецкого государственного технического университета. — 2021. — № 3 (46). — С. 86.

21. *Vasilyeva N., Golyshevskaia U., Sniatkova A.* Modeling and improving the efficiency of crushing equipment // Symmetry. 2023, vol. 15, no. 7. DOI: 10.3390/sym15071343.

22. *Тараховский А. Ю.* Трехмерное моделирование объекта на основе данных лазерного 3D-сканирования // Автоматизированное проектирование в машиностроении. — 2023. — № 14. — С. 16.

23. *Колубаев А. В.*, *Колубаев Е. А.*, *Дмитриев А. И.*, *Тарасов С. Ю.*, *Чумаевский А. В.* Фундаментальные и прикладные аспекты материаловедения в трибологии // Физическая мезомеханика. — 2024. — Т. 27. — № 6. — С. 5—32.

24. *Матренин П. В.*, *Степанова А. И.* Повышение интерпретируемости моделей прогнозирования электропотребления горнодобывающих предприятий с помощью аддитивного объяснения Шепли // Записки Горного института. — 2025. — Т. 271. — С. 154—167.

25. *Хрущов М. М.*, *Бабичев М. А.* Исследования изнашивания металлов. — М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. — 351 с.

26. *Qiu X., Potapov A., Song M., Nordell L.* Prediction of wear of mill lifters using discrete element method / 2001 SAG Conference Proceedings, 2001.

27. *Style Wu W., Che H., Hao Q.* Research on non-uniform wear of liner in SAG mill // Processes. 2020, vol. 8, article 1543. DOI: 10.3390/pr8121543.

28. *Wei T., Zhou Z., Ling X., Lv M., Di Y., Qin K., Zhou Q.* A study of the effect of roughness on the three-body wear mechanism from a microscopic point of view: Asperity peak removal // Metals. 2024, vol. 14, article 1385. DOI: 10.3390/met14121385.

29. *Florea V. A.*, *Toderaș M., Ciprian D.* The influence of roughness of surfaces on wear mechanisms in metal—Rock interactions // Coatings. 2025, vol. 15, no. 2, article 150. DOI: 10.3390/coatings15020150.

30. *Мелкумян С. А.*, *Перинская И. В.* Оценка перспектив использования метода лазерного термического упрочнения поверхности бандажа валка валковой дробилки / Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. Сборник научных статей 12-й Международной научно-практической конференции. — Курск, 2022. — С. 274—278.

31. *Дружнова Я. С.* Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. — 2022. — № 10 (116). — С. 100—115.

32. *Черепанов Д. Е., Бурдаков А. В., Вячеславов Л. Н., Казанцев С. Р., Кандауров И. В., Касатов А. А., Красильников А. В., Попов В. А., Рыжков Г. А., Шошин А. А.* Испытания покрытий из карбида бора импульсной тепловой нагрузкой, возможной в диверторной зоне токамака ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — 2024. — Т. 47. — № 1. — С. 89.

33. *Кенесбеков А. Б.*, *Сагдолжина Ж. Б.*, *Рахадилов Б. К.* Структура и механо-трибологические свойства нитрида титана, полученного воздушно-плазменным напылением // Функцияны интерполяциялау жолдары. — 2022. — С. 367.

34. *Несмачный В. В.*, *Коваленко И. В.* Влияние режимов напыления покрытий нитрида титана на качество поверхности при ионно-плазменном нанесении покрытия / EurasiaScience. Сборник статей XLII международной научно-практической конференции. — М., 2021. — С. 72—74.

35. *Орлов Д. А.*, *Ковалёв С. В.* Совершенствование процесса восстановления валов с применением плазменного напыления / Международная студенческая научно-практическая конференция «Горинские чтения. Инновационные решения для АПК». — Белгород, 2022. — С. 255.

36. *Никитенко В. В.*, *Куц Л. Е.* Способы упрочнения поверхности рабочих элементов дробилок / Перспективное развитие науки, техники и технологий. Сборник научных статей 12-й Международной научно-практической конференции. — Курск, 2022. — С. 294—298.

37. *Господариков А. П.*, *Ефимов Д. А.*, *Кусков В. Б.* Патент РФ RU 2 831 453 C1. 09.12.2024. Валковый дробящий агрегат. 2024. Бюл. № 34. ГИАБ

REFERENCES

1. Efimov D. A., Gospodarikov A. P. Technical and technological aspects of using rolls with a Relo triangle profile in crushing units at the ore preparation stage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-2, pp. 117—126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_117.

2. Matveev A. I., Lebedev I. F., Vinokurov V. R., Lvov E. S. Scientific and experimental basis of dry beneficiation of mineral ores. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 613—622. [In Russ]. DOI: 10.31897/PM1.2022.90.

3. *Dvornikov L. T., Makarov A. V., Komilov D. S.* Kinematic study of a jaw crusher with two movable jaws. *Bulletin of the siberian state industrial university*. 2019, no. 2(28), pp. 22—24. [In Russ].

4. Mitrofanova G. V., Chernousenko E. V., Kameneva Yu. S. On the flotation activity of reagents with nitrile groups in flotation of copper-nickel ores. *Obogashchenie Rud*. 2022, no. 6, pp. 13—19. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2022.06.03.

5. Aleksandrova T., Afanasova A., Nikolaeva N., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Investigation of the possibility of obtaining high-purity carbon materials and recovering valuable metals from shungite rocks. *Minerals*. 2025, vol. 15, article 90. DOI: 10.3390/min15010090.

6. Popov O., Talovina I., Lieberwirth H., Duriagina A. Quantitative microstructural analysis and X-ray computed tomography of ores and rocks—Comparison of results. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 2, article 129. DOI: 10.3390/min10020129.

7. Pelevin A. E. Iron ore beneficiation technologies in Russia and ways to improve their efficiency. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 579—592. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.

8. Bazin C., Boulanger J-F. Investigation of the flotation of an ore containing bastnaesite and monazite: Kinetic study and process flowsheet simulation. *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 9, article 906. DOI: 10.3390/min14090906.

9. Shadrunova I. V., Gorlova O. E., Kolodezhnaya E. V., Kutlubaev I. M. Adaptation of a roll crusher for processing technogenic raw materials. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2024, no. 3, pp. 175—191. [In Russ].

10. Krivov D. A. Mechanisms of destruction of plant raw materials in a roll crusher with modular plates of RK-profile. *Bulletin of KrasGAU*. 2024, no. 6(207), pp. 198—205. [In Russ]. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-6-198-205.

11. Kondrakhin V. P., Konyukhov V. Yu., Polyakova A. S., Moiseeva E. E., Boyko A. A. Calculation of the optimum parameters of a gyrating crusher for rock crushing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11-1, pp. 88—101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_88.

12. Shishkin E. V., Kazakov S. V. Energy-efficient devices for disintegration of extremely strong materials. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 11, pp. 53—59. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.07.

13. Vlasenko D. A. Analytical method for determining energy-force parameters of grinding in roll crushers with corrugated shell surfaces. *Naukoemkie tekhnologii i oborudovanie v promyshlennosti i stroitel'stve* [Science-intensive technologies and equipment in industry and construction], 2020, no. 63, pp. 93—101. [In Russ].

14. Mukras S. M. S. Computer simulation/prediction of wear in mechanical components. *Advances in tribology*, 2020. DOI: 10.1155/2020/8867351.

15. Zobova A. A. Review of distributed dry friction models. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2016, vol. 80, no. 2, pp. 194—206. [In Russ]. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2016.06.008.

16. Troitsky V. M. Prediction of abrasive wear using mathematical modeling. *Sovremennye tendentsii razvitiya instrumental'nykh sistem i metalloobrabatyvayushchikh kompleksov* [Modern trends in the development of tool systems and metalworking complexes]. 2023, pp. 479—483. [In Russ].

17. Zorenko D. A. Modern concepts of wear mechanisms of moving elements in friction units. *Mechanics*. 2022, no. 15, pp. 22—29. [In Russ].

18. Gordeev Yu. I., Binchurov A. S., Vakulin M. S., Usevich N. I., Kazakov I. S. Modernization of the design of working parts of a roll crusher. *Reshetnevskie chteniya*. 2022, pp. 546—548. [In Russ].

19. Pozhidaev Yu. A., Potapov V. Ya., Potapov V. V., Kuznetsov A. M., Sokolova A. V. Optimization of amplitude-frequency characteristics of the moving element of a roll crusher. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskikh yavleniy» (pamyati dotsenta G.E. Vebera)* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Mathematical Modeling of Mechanical Phenomena» (in memory of Assoc. Prof. G. E. Weber)], Ekaterinburg, UGGU, 2023, pp. 101. [In Russ].

20. Zhiltsov A. P., Vlasenko D. A., Kharitonenko A. A., Bocharov A. V., Kozenko N. E. Analysis and improvement of design-technological parameters of crushers for sinter burden and sinter. *Vestnik LSTU*. 2021, no. 3 (46), pp. 86. [In Russ].

21. Vasilyeva N., Golyshevskaia U., Sniatkova A. Modeling and improving the efficiency of crushing equipment. *Symmetry*. 2023, vol. 15, no. 7. DOI: 10.3390/sym15071343.

22. Tarakhovsky A. Yu. Three-dimensional modeling of an object based on laser 3D scanning data. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*. 2023, no. 14, pp. 16. [In Russ].

23. Kolubaev A. V., Kolubaev E. A., Dmitriev A. I., Tarasov S. Yu., Chumaevsky A. V. Fundamental and applied aspects of materials science in tribology. *Physical Mesomechanics*. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 5—32. [In Russ].

24. Matrenin P. V., Stepanova A. I. Improving interpretability of power consumption forecasting models of mining enterprises using additive Shapley explanations. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 271, pp. 154—167. [In Russ].

25. Khrushchov M. M., Babichev M. A. *Issledovaniya iznashivaniya metallov* [Studies of metal wear], Moscow, 1960, 351 p.

26. Qiu X., Potapov A., Song M., Nordell L. Prediction of wear of mill lifters using discrete element method. *2001 SAG Conference Proceedings*, 2001.

27. Style Wu W., Che H., Hao Q. Research on non-uniform wear of liner in SAG mill. *Processes*. 2020, vol. 8, article 1543. DOI: 10.3390/pr8121543.

28. Wei T., Zhou Z., Ling X., Lv M., Di Y., Qin K., Zhou Q. A study of the effect of roughness on the three-body wear mechanism from a microscopic point of view: Asperity peak removal. *Metals.* 2024, vol. 14, article 1385. DOI: 10.3390/met14121385.

29. Florea V. A., Toderaș M., Ciprian D. The influence of roughness of surfaces on wear mechanisms in metal—Rock interactions. *Coatings*. 2025, vol. 15, no. 2, article 150. DOI: 10.3390/coatings15020150.

30. Melkumyan S. A., Perinskaya I. V. Evaluation of prospects for using laser thermal hardening of roll crusher shell surfaces. *Innovatsionniy potentsial razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenykh. Sbornik nauchnykh statey 12-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovative potential of society development: view of young scientists. Collection of scientific articles of the 12th International Scientific and Practical Conference], Kursk, 2022, pp. 274—278. [In Russ].

31. Druzhnova Ya. S. Development of gas-thermal spraying methods for hardening coatings based on tungsten and chromium carbides (review). *Proceedings of VIAM*. 2022, no. 10 (116), pp. 100—115. [In Russ].

32. Cherepanov D. E., Burdakov A. V., Vyacheslavov L. N., Kazantsev S. R., Kandaurov I. V., Kasatov A. A., Krasil'nikov A. V., Popov V. A., Ryzhkov G. A., Shoshin A. A. Testing of boron carbide coatings under pulsed thermal loading possible in ITER divertor zone. *VANT. Series: Thermonuclear Fusion*. 2024, vol. 47, no. 1, pp. 89. [In Russ].

33. Kenesbekov A. B., Sagdolzhina Zh. B., Rakhadilov B. K. Structure and mechano-tribological properties of titanium nitride obtained by air-plasma spraying. *Funktsiyany Interpolyatsiyalau Zholdary*. 2022, pp. 367.

34. Nesmashny V. V., Kovalenko I. V. Influence of deposition modes of titanium nitride coatings on surface quality during ion-plasma coating. *EurasiaScience. Sbornik statey XLII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [EurasiaScience. Collection of articles of the XLII International Scientific and Practical Conference], Moscow, 2021, pp. 72—74. [In Russ].

35. Orlov D. A., Kovalyov S. V. Improvement of shaft restoration process using plasma spraying. *Mezhdunarodnaya studencheskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Gorinskie chteniya. Innovatsionnye resheniya dlya APK»* [International student scientific and practical conference «Gorinsky readings. Innovative solutions for agriculture»], Belgorod, 2022, pp. 255. [In Russ].

36. Nikitienko V. V., Kuts L. E. Methods of strengthening the surface of working elements of crushers. *Perspektivnoe razvitie nauki, tekhniki i tekhnologiy. Sbornik nauchnykh statey 12-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsi*i [Promising development of science, technology and technology. Collection of scientific articles of the 12th International Scientific and Practical Conference], Kursk. Курск, 2022, pp. 294—298. [In Russ].

37. Gospodarikov A. P., Efimov D. A., Kuskov V. B. Patent RU 2 831 453 C1. 09.12.2024. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Господариков Александр Петрович[1] — д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой, e-mail: kafmatem@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1018-6841,
Ефимов Денис Александрович[1] — аспирант,
e-mail: s225065@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0005-4416-6875,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Ефимов Д.А., e-mail: s225065@stud.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.P. Gospodarikov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: kafmatem@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1018-6841,
D.A. Efimov[1], Graduate Student,
e-mail: s225065@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0005-4416-6875,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106,Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: D.A. Efimov, e-mail: s225065@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 04.07.2025; получена после рецензии 19.09.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 04.07.2025; received after the review 19.09.2025; accepted for printing 10.01.2026.