

УДК 678.4.06:621.81

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЗИНОВЫХ ФУТЕРОВОК ТЯЖЁЛЫХ МАШИН В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

<sup>1</sup>Дырда В.И., <sup>1</sup>Лисица Н.И., <sup>1</sup>Калганков Е.В., <sup>1</sup>Цаниди И.Н., <sup>1</sup>Черний А.А.,  
<sup>1</sup>Агальцов Г.Н.

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

## ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГУМОВИХ ФУТЕРІВОК ВАЖКИХ МАШИН В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ

<sup>1</sup>Дирда В.І., <sup>1</sup>Лисиця М.І., <sup>1</sup>Калганков Є.В., <sup>1</sup>Цаніді І.М., <sup>1</sup>Черній О.А.,  
<sup>1</sup>Агальцов Г.М.

<sup>1</sup>Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

## SOME PECULIARITIES OF EXPERIMENTAL STUDIES OF RUBBER LINING IN HEAVY-DUTY MACHINES

<sup>1</sup>Dyrda V.I., <sup>1</sup>Lisitsa N.I., <sup>1</sup>Kalgankov Ye.V., <sup>1</sup>Tsanidy I.N., <sup>1</sup>Cherniy A.A.,  
<sup>1</sup>Agaltsov G.N.

<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine

**Аннотация.** Рассматриваются особенности экспериментальных исследований резиновых футеровок машин, работающих в экстремальных условиях, т.е. при длительных циклических и ударных нагрузках, при высоких температурах и агрессивной среде. К таким машинам относятся вибропитатели, виброгрохоты, рудоизмельчительные мельницы и т.д. При исследовании резиновых футеровок таких машин возникают трудности моделирования технологических процессов, а, следовательно, и создания имитационных моделей. Трудности возникают также с отсутствием специального экспериментального инструмента для исследования таких малоизученных процессов как абразивно-усталостный износ резины, температура нагрева и механизм разрушения резины в зоне её контакта с контртелом и т.д.

Приведены результаты исследований теплового излучения в резинах при абразивном износе и ударных нагрузках. Показано, что превышение температуры над комнатной при абразивном износе (внедрение острого индентора в резиновый массив) не превышает (24-25) °С, а продолжительность остывания нагретой зоны контакта составляет (0,6-0,7) с; для ударных нагрузок фиксируемая в зоне контакта температура составила (7-9) °С.

Приведены результаты экспериментальных исследований резиновых футеровок в условиях воздействия агрессивной среды (содержание Na<sub>2</sub>O – 240 г/л, температура среды 100 °С). После примерно 4 тыс. часов эксплуатации физико-механические характеристики резины изменились: модуль сдвига увеличился на (10-12) %, коэффициент диссипации уменьшился на (25-30) %, сопротивление истиранию уменьшилось на 40 %, изменилась также фрактальная размерность поверхности резины. Отмечается, что фрактальный анализ рабочей поверхности резиновой футеровки является эффективным методом оценки изменения во времени физико-механических характеристик материала и его структуры. Он также подтверждает, что процесс разрушения резин в случае абразивно-усталостного износа является нелинейным, особенно при катастрофических формах разрушения, когда наряду с механическими воздействиями (удар, вдавливание контртел) действуют высокая температура и агрессивная среда.

В работе исследовалось влияние фуллерена на свойства резин, были получены следующие результаты: жёсткость резины уменьшилась на (15-20) %, коэффициент диссипации увеличился на (30-36) %, на 15 % уменьшилась истираемость резин.

Приведены также результаты обширных экспериментальных исследований износостойкости резин; получены данные о влиянии на износостойкость добавок фуллерена, агрессивной среды, срока службы и т.д.

**Ключевые слова:** абразивно-усталостный износ, износостойкость, резиновая футеровка, фуллерен

**Введение.** К таким машинам относятся рудоизмельчительные мельницы, виброгрохоты, тяжёлые вибропитатели (например, для выпуска и доставки же-

лезных и урановых руд), скипы, кузова большегрузных автомобилей, цилиндрические грохоты и другие машины, предназначенные для добычи, переработки и обогащения минерального сырья. Все они работают в экстремальных условиях, т.е. при длительных циклических и ударных нагрузках, при повышенных напряжениях в случае переработки крупнокускового материала, в условиях нестабильного теплового поля и агрессивной внешней среды: кислот, щелочей, масел, радиации и т.д. [1-6].

В этих случаях механизмы деформации и разрушения их деталей и узлов (рабочие органы, резиновые футеровки, упругие звенья) отличаются особенностями, которые следует учитывать при экспериментальных исследованиях. Прежде всего, это известные трудности моделирования технологических процессов, а, следовательно, и создание имитационных моделей взаимодействия перерабатываемого сырья с рабочим органом (например, в барабане мельницы взаимодействие монодисперсоида нагрузки резиновой футеровки); определённые трудности также связаны с отсутствием специального экспериментального инструмента для исследования таких малоизученных процессов как абразивно-усталостный износ резины, напряжённо-деформированное состояние элементов футеровки, температура нагрева и механизма разрушения в зоне контакта контртел (шары, перерабатываемый материал, пульпа) и футеровки. Вместе с тем, длительная практика показала, что именно эти процессы зачастую и определяют долговечность резиновой футеровки. Исследованию этих процессов и посвящена настоящая статья.

### **1. Экспериментальные исследования теплового излучения в резиновых футеровках при абразивном износе и ударных нагрузках**

При исследовании механизмов разрушения резин от абразивного износа и ударных нагрузок (вдавливание шара в футеровку и удар о футеровку) весьма важными являются исследования теплового излучения в зоне контакта резины и индентора. Впервые такие исследования при единичных актах усталостного и абразивного разрушения резин было опубликовано в 1976 году в журнале «Каучук и резина» (авторы: Дырда В.И., Надутый В.П., Егоров Е.А.).

Обычно абразивный износ имитируют внедрением в массив резины острого индентора. Правомочность такого подхода была доказана в ранних работах А. Шалламаха в 1953 и в 1967 годах.

В настоящей работе металлические инденторы диаметром 0,1-2,5 мм внедрялись в резиновую пластину толщиной 4 мм и передвигались по ней со скоростью 0,03 м/с при постоянной нагрузке 26 Н. Температуру в зоне контакта измеряли инфракрасным радиометром; испускаемое тепловое излучение фокусировалось светосильным зеркальным объективом радиометра на приёмник (фоторезистор на основе сурьмянистого индия, работающий при температуре жидкого азота).

**Результаты испытаний.** Локальное превышение температуры над комнатной ( $T_k = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ) было следующим: для индентора диаметром 2,5 мм

$\Delta T = (6-8)^\circ\text{C}$ ; для индентора диаметром 0,1 мм (по А. Шалламаху это соответствует единичным актам абразивного истирания)  $\Delta T = (24-25)^\circ\text{C}$ . Продолжительность остывания нагретой зоны контакта составляла примерно 0,6-0,7 с.

В случае исследования ударных нагрузок, тепловое излучение в зоне контакта шара и резиновой футеровки фиксируют обычно с помощью стандартных термопар или тепловизоров. Недостатки экспериментальных средств общеизвестны: термопары, благодаря своей инерционности и быстрому охлаждению зоны контакта (примерно 0,5 с), фиксируют лишь часть теплового излучения, а конструкции современных тепловизоров не приспособлены для подобных исследований. В настоящей работе температуру в зоне контакта шара и резиновой футеровки определяли с помощью хромель-копелевых термопар. Металлический шар диаметром 100 мм падал с высоты 2 м на резиновую футеровку мельницы МШЦ 3,6×4,5 (толщина футеровки составляла 160 мм). Фиксируемая в зоне контакта температура составляла  $\Delta T = (7-9)^\circ\text{C}$ .

Если учесть, что температура в рудоизмельчительной мельнице составляет примерно  $(45-50)^\circ\text{C}$ , а температура футеровки  $(62-67)^\circ\text{C}$  [2], то можно констатировать, что температура в локальных микрорегионах футеровки (особенно в поверхностном слое) всегда будет выше. Именно с этим фактом и связана большая поврежденность поверхности слоя резины, что следует учитывать при расчетах долговечности резиновых футеровок.

Механизм разрушения резиновых футеровок горных питателей на выпуске и доставке руд в целом будет идентичен описанному выше. Следует лишь учитывать единичные акты поврежденности резиновых плит при взрыве негабаритов; в этих случаях и упругие связи и футеровка будут испытывать экстремальные напряжения, а, следовательно, в микрорегионах резины будет более высокая поврежденность.

## **2. Экспериментальные исследования резиновой футеровки в условиях воздействия агрессивных сред**

Исследованию подлежала резиновая футеровка типа «Плита Н- Волна» (высота футеровки  $H = 210$  мм; конструкция ООО «НПП Валса-ГТВ») в шаровой мельнице МС-3,0×6,25. Согласно технологической схеме, процесс измельчения сырья происходит при следующих параметрах:

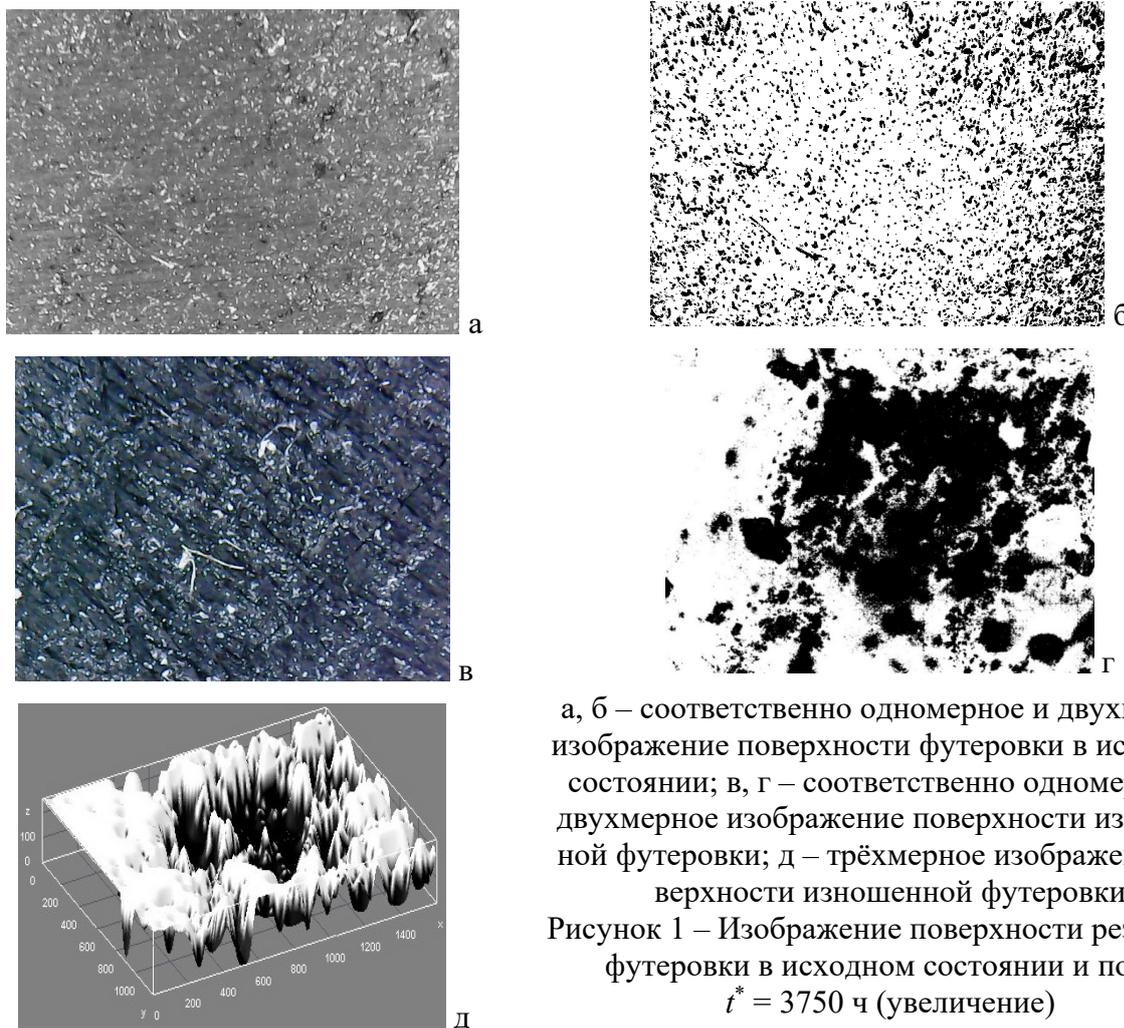
- шаровая загрузка: диаметр шара 90 мм (20 %), диаметр шара 70 мм (60 %), диаметр шара 50 мм (20 %);
- крупность куска в питании – в среднем 100 мм и до 10-20 % крупность до (300-400) мм; материал обладает абразивностью (острые кромки на кусках);
- процент твёрдого в пульпе – 700 г/л;
- содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  в мельнице – 240 г/л;
- температура среды в мельнице:  $95^\circ\text{C}$  и выше; рабочая  $(85-90)^\circ\text{C}$ ; температура пульпы на входе в мельницу –  $(85-90)^\circ\text{C}$ , на выходе –  $(60-65)^\circ\text{C}$ .

Известно [2], что футеровочные резины устойчиво работают при температурах не выше  $(80-95)^\circ\text{C}$ ; более высокие температуры приводят к термодеструкции, прежде всего рабочей поверхности резины, к резкому увеличению скорости старения, т.е. к увеличению скорости накопления поврежденности (прежде всего

в поверхностном слое) и в целом к изменению структуры резины. Учитывая эти особенности, основными информационными параметрами были приняты: температура в массиве резиновых плит, изменения условно-равновесного модуля сдвига и коэффициента диссипации, сопротивление истиранию, изменение фрактальной размерности, изменение макроструктуры резины и долговечность резиновой футеровки.

Результаты экспериментальных исследований резины в исходном состоянии и после отказа, были следующими:

- наблюдалось увеличение модуля сдвига на (10-12) %, снижение коэффициента диссипации на (25-30) %, снижение сопротивления истиранию примерно на (30-40) %;
- рабочая поверхность изношенной футеровки характеризовалась кавернами, раздирами и порезами за счёт внедрения острых кромок кусков боксита;
- температура на поверхности резиновых плит была в пределах (90-95) °С; в массиве плит 100 °С и выше;
- фрактальная размерность  $d_f$  поверхности резины с наработкой изменилась: для исходной резины  $d_f = 2,8596$ , для изношенной резины  $d_f = 2,8160$ ;
- исследования поверхности резины в исходном состоянии и после 3750 часов наработки, показывают существенные изменения микроструктуры материала (рис. 1);



а, б – соответственно одномерное и двумерное изображение поверхности футеровки в исходном состоянии; в, г – соответственно одномерное и двумерное изображение поверхности изношенной футеровки; д – трёхмерное изображение поверхности изношенной футеровки  
Рисунок 1 – Изображение поверхности резиновой футеровки в исходном состоянии и после  $t^* = 3750$  ч (увеличение)

- резиновая футеровка отработала 3750 часов, после чего была снята в связи с разрушением плит до остаточной толщины 40 мм (в некоторых плитах меньше);
- следует отметить высокое качество резины, особенно сопротивляемость её старению и износу.

Выход из строя резиновой футеровки связан с совокупностью перечисленных экстремальных условий эксплуатации. Процесс абразивно-усталостно-коррозионного износа при весьма высокой концентрации щелочной агрессивной среды (содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  – 240 г/л) и критических температурах (температура в массиве резиновых плит (100-110) °С ; рабочая температура футеровочных резин при длительной эксплуатации не должна превышать 80 °С, с кратковременными периодами не выше 85 °С)

[1] сопровождался накоплением повреждений как на микро- так и макроуровнях в объёме массива и на рабочей поверхности плит. После, примерно, 3300 часов концентрация накопленных повреждений (особенно в поверхностном слое) достигла некоторого критического уровня, сопротивление истираемости резко уменьшилось, скорость износа резко возросла и процесс разрушения стал катастрофическим.

На рис. 2 показана кривая износа резиновой футеровки: до точки А скорость износа была незначительной, после примерно 3300 часов, она резко возросла и продолжалась до точки В, т.е. до отказа плит. Точка А соответствует локальной долговечности футеровки, т.е.  $t_l = 0,9t^*$ , где  $t_l$  – долговечность резины в локальных объёмах;  $t^*$  – время до отказа плит. Следует также отметить, что до

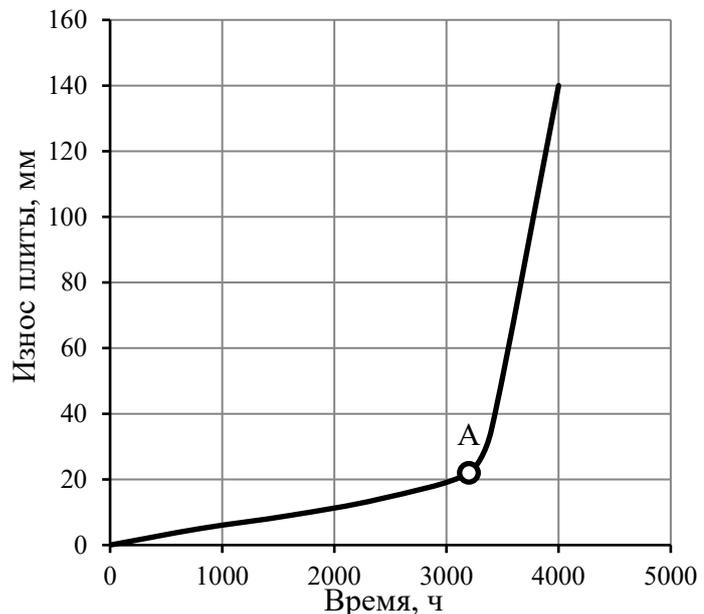


Рисунок 2 – Износ плит (по выступам) в загрузочной части мельницы

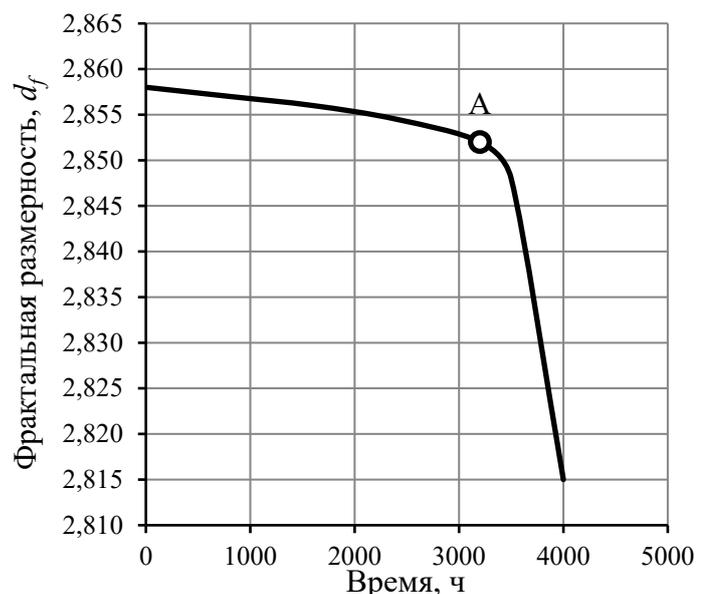


Рисунок 3 – Изменение фрактальной размерности  $d_f$  рабочей поверхности плит от наработки

точки А процесс разрушения был квазилинейным, после – сугубо нелинейным; эта закономерность характерна для работы резиновых футеровок в экстремальных условиях и не противоречит полученным ранее данным [1].

Следует также отметить весьма важную закономерность: фрактальная зависимость поверхности резиновых плит с различной наработкой в качественном смысле идентична кривой износа. (рис. 3).

Как видно, фрактальный анализ рабочей поверхности резиновой футеровки является весьма эффективным методом оценки изменения во времени физико-механических характеристик материала и его структуры. Он также подтверждает, что процесс разрушения резин в случае абразивно-усталостного износа является нелинейным, особенно при катастрофических формах разрушения, когда наряду с механическими воздействиями (удар, вдавливание контртел и т.д.) действуют высокая температура и агрессивная среда. Следует также отметить, что в локальных зонах интенсивного износа резиновых плит скорость разрушения будет больше, чем в среднем по всей поверхности барабана, о чем свидетельствует неравномерность износа футеровки как по длине мельницы так и по её диаметру; при этом (и это не противоречит общим закономерностям механики разрушения упруго-наследственных сред (см. Булат А.Ф., Дырда В.И., Звягильский Е.Л., Кобец А.С. Прикладная механика упруго-наследственных сред. т. 1, 2011 г); в локальных зонах интенсивность разрушения материала будет больше, соответственно и процесс разрушения будет более нелинейным.

### **3. Экспериментальные исследования резин с добавками фуллерена $C_{60}$**

Исследованию подлежала средненаполненная футеровочная резина (45-50 масс.ч. технического углерода) с добавками фуллерена  $C_{60}$ . Из такой резины изготавливались цилиндрические образцы ( $\varnothing 100$  мм, высота 50 мм); исследовались образцы исходной резины и резин с 0,05 масс.ч. фуллерена при деформации сжатия и сдвига с фиксацией модуля сдвига и коэффициента диссипации согласно методики [6]. Сравнительные исследования влияния фуллерена на физико-механические характеристики резин показали следующее:

- на 15-20 % уменьшилась жёсткость образцов, а, следовательно, уменьшился и модуль сдвига;
- на 30-36 % увеличился коэффициент диссипации, что свидетельствует об увеличении эластичности материала;
- на 15 % уменьшилась истираемость резины;
- структура резины с добавкой фуллерена обладает большей порядочностью;
- увеличилась фрактальная размерность: для исходной резины  $d_f = 2,9131$ , для резины с фуллереном  $d_f = 2,9313$ .

Эти результаты не противоречат данным других авторов [3-5].

### **4. Экспериментальные исследования эффектов старения резиновых футеровок при их длительной эксплуатации**

Исследованию подлежали резиновые футеровки двух рудоразмельчительных мельниц: в первом случае рассматривалась мельница МШР 3,6×4,0 с футеровкой «Плита Н-Волна» ( $H = 270/240$  мм, производство ООО «НПП Валса-

ГТВ»), ПАО «Северный ГОК», первая стадия измельчения, шар  $\varnothing 100$  мм, наработка резиновой футеровки на отказ 6850 ч [1]; во втором случае рассматривалась мельница МШР 4,0×5,25 с футеровкой «Плита Н-Волна» ( $H = 270/240$  мм, производство ООО «НПП Валса-ГТВ»), ОАО «Полтавский ГОК», первая стадия измельчения, шар  $\varnothing 100$  мм, наработка на отказ 9030 ч [1]. В обоих случаях остаточная толщина футеровки была примерно одинаковой – (40-100) мм.

Из футеровочных плит вырезались образцы размером 35×60×100 мм и подвергались механическим испытаниям для определения модуля сдвига, коэффициента диссипации и фрактального размера поверхности резины.

Несмотря на различный диаметр мельниц и различную наработку резиновых футеровок до отказа, результаты испытаний оказались примерно одинаковыми; это связано с тем что. Футеровка на ПАО «Северный ГОК» работала в более тяжёлых условиях: в питании мельницы присутствовали не свойственные для технологии первой стадии измельчения размеры частиц 50-200 мм, что привело и к более интенсивному износу элементов футеровки, и к увеличению скорости старения материала.

За время эксплуатации мельниц, изменение физико-механических характеристик резин было следующим: условно-равновесный модуль сдвига увеличился на (30-40) %; коэффициент диссипации энергии уменьшился на (40-50) %, что в качественном смысле не противоречит результатам длительного старения при интенсивных циклических нагрузках [2].

Старение уменьшает фрактальную размерность резины: для исходной резины  $d_f = 2,8472$ , для резины с наработкой  $t^* = 6850$  ч –  $d_f = 2,8204$ . (рис. 4).

При этом отмечен весьма важный эффект: для тыльной стороны футеровки, примыкающей непосредственно к барабану мельницы,  $d_f = 2,8365$ . Это свидетельствует о том, что именно в поверхностном слое футеровки (толщиной примерно 10-12 мм) процессы разрушения (удар, вдавливание инденторов, абразивно-усталостный износ и т.д.) имеют наибольшую интенсивность. В этом же слое происходит и наиболее интенсивное изменение структуры материала. Тыльная же сторона фу-

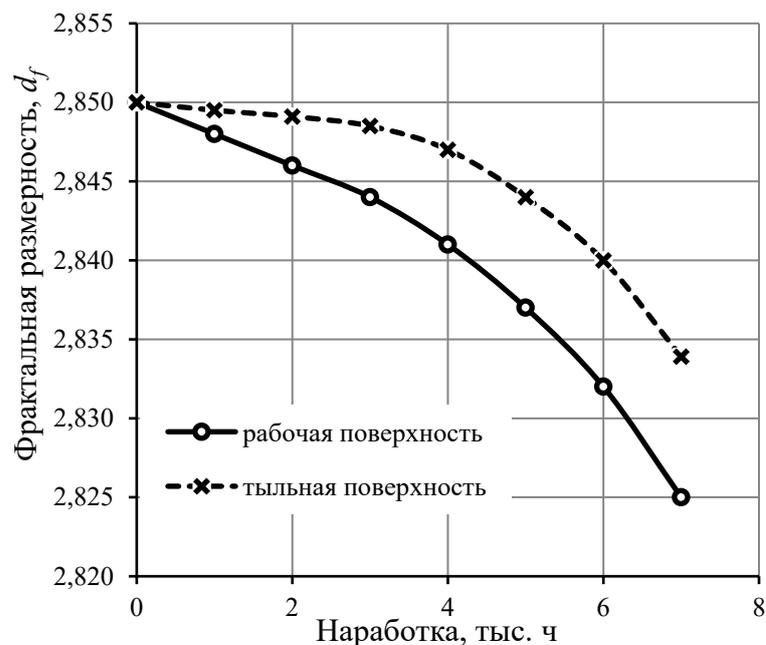


Рисунок 4 – Зависимость фрактальной размерности поверхности резиновой футеровки от времени наработки: ПАО СевГОК, мельница МШР 3,6×4,0; шар 100 мм; наработка на отказ  $t^* = 6850$  ч

теровки при соблюдении правил эксплуатации мельницы (остаточная толщина футеровки не менее 40-50 мм) остаётся менее повреждённой, что и подтверждается фрактальным анализом.

### 5. Экспериментальные исследования износостойкости резин

Такие исследования наиболее целесообразно проводить согласно ГОСТ 426-77 (Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении). Использовался экспериментальный стенд МИ-2 и стандартные образцы из футеровочной резины размером 20×20×8 мм.; образцы присоединялись к специальной рамке-держателю и истирались на шлифовальной шкурке (по ГОСТ 426-77). Стандартными параметрами процесса являлись: сила прижатия образцов к шлифовальной шкурке –  $F = 26$  Н; время истирания  $t = 300$  с; скорость истирания  $V = 0,285$  м/с. Для статистической обработки данных проводилось не менее девяти испытаний. В процессе экспериментальных исследований фиксировалось количество частиц износа и их геометрические размеры.

Исследованию подлежали резины типа 2959 (в том числе с добавкой фуллерена  $C_{60}$  с массовым объёмом 0,05 масс.ч.), а также футеровочные резины в исходном состоянии, после наработки 9030 часов при действии агрессивной внешней среды.

Результаты испытаний:

**Влияние добавок фуллерена.** Истираемость образцов с добавкой фуллерена меньше примерно на 15 % чем у резин без добавки фуллерена; при этом изменяется структура истираемого материала: благодаря повышению эластичности резины с добавкой фуллерена, агрегаты износа являлись более мелкие по сравнению с резиной без добавки фуллерена.

**Влияние агрессивной среды.** Испытаниям подлежали образцы футеровочной резины с 65 масс.ч. технического углерода в исходном состоянии и резины после 3750 часов работы в мельнице МС 3,0×6,0 при дезинтеграции бокситов (температура в мельнице до 110 °С, содержание щелочи 240 г/л). Как показали исследования истираемость изношенной резины на (20-25) % больше, чем у исходной резины, а плотность энергии разрушения уменьшилась соответственно на (15-20) %. При этом отмечены структурные изменения резин – для изношенной резины характерно наличие более крупных агрегатов износа.

**Влияние срока службы.** Испытаниям подлежали образцы футеровочной резины в исходном состоянии и образцы изношенной резины (футеровка «Плита Н-Волна» в мельнице МШР 4,5×5,0 шар  $\varnothing 100$  мм с наработкой 9030 часов). Как показали исследования, истираемость изношенной резины на (15-17) % больше, чем у исходной резины; структурные изменения в резине выражались в наличии в истираемом материале более крупных агрегатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дырда, В.И. Резиновые футеровки технологических машин / В.И. Дырда, Р.П. Зозуля, О.Н. Хоменко, О.Н. Хмель. – Днепр: Журфонд, 2016. – 260 с.
2. Булат, А.Ф. Прикладная механика упругонаследственных сред / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – Киев: Наук. думка, 2012. – Т. 2. Методы расчета эластомерных деталей. – 2012. – 616 с.
3. Щелокова, М.А. Фрактальный подход к решению задачи о накоплении повреждений / М.А. Щелокова, Е.В. Коротунова, Ю.В. Мастиновский // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2005. – № 2. – С. 80-83.

4. Леонтьева, М.А. Повышение качества легковых шин на основе нанокремнезема / М.А. Леонтьева, Н.Л. Клейменова, Т.И. Игуменова // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3. – С. 135-136.
5. Игуменова, Г.В. Исследование структуры и свойств полимеров, усиленных наноматериалами / Г.В. Игуменова, Г.В. Попов // Материалы международного форума по нанотехнологиям 3-5 декабря 2008 г. – М.: ГК «Роснанотех», 2008. – Т. 1, С.Т.И.
6. Дырда, В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях / В.И. Дырда. – Киев: Наук. думка, 1988. – 232 с.

#### REFERENCES

1. Dyrda, V.I., Zozulya, R.P. (et al.) (2016), *Rezinovyye futerovki tekhnologicheskikh mashin* [Rubber lining of technological machines], Zhurfond, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskii, E.L. and Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugo-nasledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Design techniques of elastomeric parts], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
3. Shchelokova, M.A., Korotunova, E.V. and Mastinovskii, Yu.V. (2005), "Fractal approach to solving the problem of accumulation of damages", *Novi materialy i tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni*, no. 2, Zaporizhzhia, Ukraine.
4. Leontieva, M.A., Cleimenova, N.L. and Igumenova, T.I. (2016), "Improving the quality of car tires based on nanocarbon", *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestneyk*, no 3, pp. 135-136.
5. Igumenova, G.V. and Popov, G.V. (2008), "Investigation of the structure and properties of polymers reinforced with nanomaterials", *Materialy mezhdunarodnogo foruma po nanotekhnologiam 3-5 dekabria 2008 g.* Moscow, RF.
6. Dyrda, V.I. (1988), *Prochnost i razrusheniye elastomernykh konstruksiy v ekstremalnykh usloviyakh* [Strength and destruction of elastomeric structures in extreme conditions], Naukova dumka, Kiev, USSR.

#### Об авторах

**Дырда Виталий Илларионович**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, vita.igtm@gmail.com

**Лисица Николай Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, vita.igtm@gmail.com

**Цаниди Иван Николаевич**, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина.

**Калганков Евгений Васильевич**, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина.

**Черний Александр Анатольевич**, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, sanek20.1984@gmail.com

**Агальцов Геннадий Николаевич**, инженер, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, ag.gena@gmail.com

#### About the authors

**Dyrda Vitaly Illarionovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

**Lisitsa Nikolay Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

**Tsanidy Ivan Nikolaevich**, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine

**Kalgankov Yevgeniy Vasilievich**, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine

**Cherniy Alexandr Anatolyevich**, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, sanek20.1984@gmail.com

**Agaltsov Gennady Nikolaevich**, Master of Science, Junior Researcher of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, ag.gena@gmail.com

**Анотація.** Розглядаються особливості експериментальних досліджень гумових футеровок машин, що працюють в екстремальних умовах, тобто при тривалих циклічних і ударних навантаженнях, при високих температурах і агресивному середовищі. До таких машин відносяться віброживильники, віброгрохоти, рудоподріблювальні млини тощо. При дослідженні гумових футеровок таких машин виникають труднощі моделювання технологічних процесів,

а, отже, і створення імітаційних моделей. Труднощі виникають також з відсутністю спеціального експериментального інструменту для дослідження таких маловивчених процесів як абразивно-втомний знос гуми, температура нагріву і механізм руйнування гуми в зоні її контакту з контртілом тощо.

Наведено результати досліджень теплового випромінювання в гумах при абразивному зносі і ударних навантаженнях. Показано, що перевищення температури над кімнатною при абразивному зносі (вдавлювання гострого індентора в гумовий масив) не перевищує (24-25) °С, а тривалість охолодження нагрітої зони контакту становить (0,6-0,7) с; для ударних навантажень температура, що фіксується в зоні контакту складала (7-9) °С.

Наведено результати експериментальних досліджень гумових футеровок в умовах дії агресивного середовища (концентрація  $\text{Na}_2\text{O}$  – 240 г/л, температура середовища 100 °С). Після приблизно 4 тис. годин експлуатації фізико-механічні характеристики гуми змінилися: модуль зсуву збільшився на (10-12) %, коефіцієнт дисипації зменшився на (25-30) %, опір стиранню зменшився на 40 %, змінилася також фрактальна розмірність поверхні гуми. Відзначається, що фрактальний аналіз робочої поверхні гумової футеровки є ефективним методом оцінки зміни в часі фізико-механічних характеристик матеріалу і його структури. Він також підтверджує, що процес руйнування гум в разі абразивно-втомного зносу є нелінійним, особливо при катастрофічних формах руйнування, коли поряд з механічними діями (удар, вдавнення контртіл) діють висока температура і агресивне середовище.

У роботі досліджувався вплив фуллерена на властивості гум, були отримані наступні результати: жорсткість гуми зменшилася на (15-20) %, коефіцієнт дисипації збільшився на (30-36) %, на 15 % зросла стійкість до стирання гум.

Наведено також результати великих експериментальних досліджень зносостійкості гум; отримані дані про вплив на зносостійкість добавок фуллерену, агресивного середовища, терміну служби і т.д.

**Ключові слова:** абразивно-втомний знос, зносостійкість, гумова футеровка, фуллерен.

**Abstract.** The authors consider specificity of experimental studies of rubber linings in machines operating under extreme conditions, i.e. long-term cyclic and shock loads, high temperatures and aggressive environments. Such heavy-duty machines include vibrating feeders, vibrating screens, ore-grinding mills, etc. Researchers of rubber lining in these machines face with difficulties while modeling technological processes, and, consequently, creating simulation models. Difficulties also arise due to absence of special experimental tool for studying such poorly studied processes as abrasion and fatigue wear of rubber, temperature of heating and mechanism of rubber destruction in zones contacting with counterbody, etc.

Results of investigations of thermal radiation in rubbers at their abrasive wear and shock loads are presented. It is shown that during abrasive wear (indentation of an acute indenter into a rubber massif), rise of temperature does not exceed indoor temperature (24-25) °C, and duration of cooling of the heated contact zone is (0.6-0.7) s; for shock loads, the temperature fixed in the contact zone was (7-9) °C.

Results of experimental studies of rubber lining under the influence of an aggressive medium are presented (content of  $\text{Na}_2\text{O}$  was 240 g/l, and ambient temperature was 100 °C). After about 4 thousand hours of operation, physical and mechanical characteristics of rubber changed: shear modulus increased by (10-12) %, dissipation coefficient decreased by (25-30) %, abrasion resistance decreased by 40 %, and fractal dimension of the rubber surface also changed. It is noted that fractal analysis of working surface of the rubber lining is effective for estimating changes of physical and mechanical characteristics of the material and its structure in the course of time. The analysis also confirms that process of rubber destruction in case of abrasive fatigue wear is nonlinear, especially in case with catastrophic forms of destruction when high temperature and aggressive environment (impact, indentation of counterbodies) act along with mechanical effects.

Action of fullerene on the properties of rubbers was also investigated. The following results were obtained: hardness of rubber decreased by (15-20) %, dissipation coefficient increased by (30-36) %, and abrasion of rubbers decreased by 15 %.

Findings of extensive experimental studies of the rubber wear resistance are also presented; data on effect of fullerene additives, aggressive media, service life, etc. on the wear resistance were obtained.

**Keywords:** abrasion-fatigue wear, wear resistance, rubber lining, fullerene.

*Статья поступила в редакцию 17.01.2018*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым*