

## РАСЧЁТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЗИНОВЫХ ФУТЕРОВОК ШАРОВЫХ РУДОРАЗМОЛЬНЫХ МЕЛЬНИЦ С УЧЁТОМ СТАРЕНИЯ РЕЗИНЫ

**Аннотация.** Рассматривается методика расчёта долговечности резиновых футеровок рудоизмельчительных мельниц с учётом старения резины. Приводятся: модели разрушения футеровки; методика и результаты экспериментальных исследований процессов разрушения футеровки, расчёт её долговечности с использованием энергетического критерия разрушения.

**Ключевые слова:** мельница, абразивный износ, усталостный износ, диссипация, энергия разрушения, энергетический критерий, синергетическая модель, долговечность, старение, резиновая футеровка.

Ye.V. Kalgankov, Ph. D. Student,  
(IGTM NAS of Ukraine)

## CALCULATION OF DURABILITY OF RUBBER LININGS OF SPHERICAL MILLS FOR ORE CRUSHING TAKING INTO ACCOUNT RUBBER AGING

**Abstract.** The method of calculation of durability of rubber linings of mills for ore crushing taking into account aging is considered. It is provided: models of destruction of lining; technique results of pilot studies of processes of destruction of lining and calculation of its durability with use of power criterion of destruction.

**Keywords:** mill, abrasive wear, fatigue wear, dissipation, energy of destruction, power criterion, synergetic model, durability, aging, rubber lining.

**Постановка проблемы.** Практика применения в качестве футеровки барабанов мельниц резины, показывает, что применение такой футеровки имеет ряд преимуществ, а именно: уменьшение веса, увеличение срока службы, уменьшение шума и т.д.; также доказано что применение резиновой футеровки снижает расход мелющих тел на 10 %, расход электроэнергии на 7-10 % и повышает раскрытие рудных зёрен на (1,8-3,0) %: при этом отсутствуют чёткие, конкретные методики расчёта параметров футеровок [1].

В известной литературе [1-3] при проектировании футеровки не учитывается вид и характер износа материала, вместе с тем эти факторы влияют на долговечность футеровки. Несмотря на многие виды износов, которым подвержена резиновая футеровка, наиболее опасным является усталостный износ, возникающий вследствие многократного вдавливания загрузки (измельчаемый материал и шары) мельницы, то есть старение резины.

Существующие методики расчёта не учитывают особенности реальной эксплуатации, что особенно важно при оценке остаточного ресурса действующей футеровки и прогнозирования долговечности новой. Применение такого подхода при расчётах РФ на сопротивление усталости не позволяет учесть влияние реальной истории нагружения на процесс накопления повреждений, а при расчётах параметров футеровки не рассмотренными остаются многие особенности накопления и роста усталости материала.

**Анализ исследований и публикаций.** Проблеме исследования абразивного и усталостного износа посвящены работы таких ученых как С.И. Дымников,

Э.Э. Лавендел, В.Л. Бидерман, Г.М. Бартенев, И.В. Крагельский, М.М. Резниковский, Е.Ф. Чижик, Шалламах, Мур, Грош и другие. Но большинство авторов рассматривают виды износа и их действие на материал, отдельно, что не в полной мере отражает реальную картину работы футеровки.

Основным недостатком большинства теорий расчёта долговечности резин является то, что описывают они одноосное напряжённое состояние. Полученные зависимости довольно сложны, кроме того, они требуют большого количества экспериментальной трудноопределимой информации, благодаря чему точность данных критериев низкая, имеется разброс в широких пределах полученных результатов.

Анализ научных литературных источников по трению и износу твёрдых тел [1-3], показывает, что большинства из них не учитывают эффекты старения, имеющие тем не менее весьма важное влияние на долговечность. Таким образом, требуется разработка и внедрение новых методов расчёта параметров и долговечности РФ с учётом особенностей эксплуатации, а именно старения в следствии абразивно-усталостного износа.

**Цель.** Разработать модели разрушения резиновой футеровки вследствие действия абразивно-усталостного износа и разработать методику расчёта параметров футеровки с учётом её старения.

**Синергетическая модель разрушения эластомеров при длительном циклическом нагружении.** Подробно модель рассматривалась в [1]. Ниже остановимся на основных закономерностях механизма разрушения, необходимых для объяснения применимости энергетического критерия к расчёту долговечности эластомеров. Рассмотрим кратко основные механизмы разрушения резиновой футеровки.

1. Во вращающемся барабане стохастическое движение внутримельничной загрузки имеет сложный иерархический порядок распределения частиц по крупности: большие куски измельчаемого материала и металлические шары находятся преимущественно в верхней части сегмента, на границе раздела фаз загрузка-футеровка находится своеобразная пульсирующая с мощным турбулентным движением гидроподушка в виде пульпы с большим содержанием твёрдых частиц. В связи со сложным рельефом резиновой футеровки движение пульпы является исключительно турбулентным с наличием сложных структурных образований, имеющих вихреобразное и спиралевидное движение; в турбулентном движении пульпы всегда будут присутствовать пульсирующие поля скоростей и давлений.

2. В зоне пяты отката на стыке загрузки и футеровки благодаря турбулентному движению пульпы наблюдается мощное структурное образование – монодисперсоид, геометрические размеры и форма которого являются устойчивыми только на коротких промежутках времени. Движение монодисперсоида является одним из основных факторов износа футеровки, т.к. именно в его объёме металлические шары и крупные куски измельчаемого материала непосредственно соприкасаются с поверхностью футеровки; при этом твёрдые частицы благодаря турбулентности находятся в псевдосжиженном (кипящем) состоянии с постоянным хаотическим движением. Поэтому в зоне контакта наблюдаются различные

виды разрушения резиновой футеровки: удар, вдавливание и абразивно-усталостный износ.

3. Разрушение резиновой футеровки имеет довольно сложную пространственно-временную форму и зависит от целого ряда факторов, интенсивность проявления которых определяется законом случайностей.

4. В процессе эксплуатации мельниц геометрические параметры резиновой футеровки не остаются постоянными, прежде всего, вследствие абразивно-усталостного износа. Изменение параметров носит случайный характер и непосредственно связано с детерминированным многомерным хаосом и характеризуется сложным пространственно-временным поведением. Тем не менее, при разрушении футеровки (в основном её износе; вырывы, сколы материала, глубокие трещины можно рассматривать как случайные повреждения) наблюдается определённая закономерность, свидетельствующая о существовании некоторой формообразующей тенденции, характеризующейся определённой универсальной постоянной. Об этом свидетельствует и волновая форма износа элементов футеровки, и речной узор и т.д. Разрушение как нелинейный вероятностный процесс создаёт множество форм изношенности плит и лифтов футеровки, что не позволяет использовать для их описания одну математическую функцию.

5. В дальнейших расчётах резиновой футеровки будут рассмотрены наиболее важные механизмы разрушения, а именно: удар, вдавливание и абразивно-усталостный износ.

**Общая схема расчёта долговечности резиновой футеровки.** Схема расчета долговечности резиновых футеровок состоит из последовательного решения замкнутой системы уравнений [2]:

- уравнения равновесия и совместности деформаций;
- реологическое уравнение;
- уравнение теплопроводности;
- критериальное уравнение разрушения.

Решение этой системы уравнений позволяет определить долговечность резиновой футеровки, после чего можно вносить соответствующие изменения в режим нагружения или значения механических параметров, добиваться таким образом заданной долговечности.

Для определения полей напряжений при  $v = \text{const}$  и отсутствии массовых сил в работе использованы квазистатические уравнения Ляме [9].

$$\Delta \vec{U} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \text{grad div } \vec{U} = 0, \quad (1)$$

где  $\vec{U}$  – вектор перемещений.

При введении функции гидростатического давления  $S$  задача определения полей напряжений и деформаций сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\Delta U + \frac{dS}{dx_i} = 0; \quad \frac{dU_1}{dx_1} + \frac{dU_2}{dx_2} + \frac{dU_3}{dx_3} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $x_i$  – обобщённая координата.

Для расчёта полей напряжений резиновой футеровки находится решение этих уравнений при соответствующих граничных условиях. При решении реологического уравнения используются соотношения линейной теории вязкоупругости резины, решение которого позволяет определить её реологические параметры. Уравнение теплопроводности решается для определения температурного поля от диссипативного саморазогрева в резиновом массиве.

При определении долговечности резиновой футеровки используется два критерия разрушения: допускаемой повреждённости и энергетический диссипативного типа, которые связывают параметры разрушения резины со временем наработки до отказа.

Для определения долговечности резиновых футеровок по предложенной схеме, а также для их оптимального проектирования и выбора подходящей марки резины необходимо располагать следующим набором экспериментальных параметров:

- реологическими и теплофизическими параметрами;
- параметрами, характеризующими микро- и макроразрушение, а также диссипативный саморазогрев;
- параметрами, характеризующими механику разрушения резин и натуральных резиновых элементов конструкций.

При расчёте резиновой футеровки разрабатываем: алгоритм расчёта который учитывает экспериментальную информацию о физико-механическом поведении резиновой футеровки при длительном действии загрузки мельницы и определяем критерии разрушения футеровки. И алгоритм, и критерии разрушения можно построить исходя из термодинамического подхода описания разрушения резины.

Для определения долговечности эластомерных конструкций по предложенной схеме, а также для их оптимального проектирования и выбора подходящей марки резины необходимо располагать следующим набором экспериментальных параметров: реологическими и теплофизическими параметрами; параметрами, характеризующими макроразрушение и диссипативный саморазогрев; параметрами, характеризующими механику разрушения резин и натуральных элементов.

**Определение энергии разрушения резины.** Исследование рассеяния энергии деформации в полимерных материалах и сопоставление её с тепловой было проведено для жёстких полимеров в работах [1-4]. Прямыми калориметрическими измерениями показано, что при циклическом кручении ПММА на разогрев образца используется примерно 65 % суммарной рассеянной энергии деформации.

**Экспериментальные исследования.** Рассмотрим подробно проведение экспериментальных исследований для определения соотношения тепловых и механических потерь для резинометаллических элементов типа БРМ101 из различных марок резин при циклических деформациях сдвига [2, 4].

Исследованные образцы представляли собой стандартные резинометаллические элементы сдвига типа БРМ-101, изготовленные из резины марок 51-1562, 2959, тип А.

Кинематическая схема стенда с используемой измерительной аппаратурой приведена в [1]. Эксперимент проводился при стационарном тепловом режиме,

т.е. замеры температуры образца производились после того, как она прекращала свой рост и устанавливалась на определённом значении. При этом вся тепловая энергия, производящаяся внутри образца, выходит через поверхность образца наружу и рассеивается в окружающей среде и деталях экспериментальной установки, соприкасающихся с образцом. В данном случае соотношение тепловых и полных механических потерь необходимо характеризовать отношением тепловой энергии, производимой в образце за единицу времени, т.е. мощностью тепловых источников  $U_T$ , к величине диссипированной энергии за единицу времени, т.е. мощностью диссипации энергии  $U_D$ :

$$\eta = \frac{U_T}{U_D}. \quad (3)$$

В описываемом эксперименте мощность диссипации  $U_D$  находилась с помощью коэффициента диссипации энергии  $\psi$ , который определялся методом динамической петли гистерезиса. Обозначив амплитуду деформации образца через  $A$ , амплитуду силы, приложенной к образцу –  $P$ , и частоту деформаций –  $\omega$ , получим:

$$U_D = \frac{1}{2} AP\psi\omega. \quad (4)$$

Для определения мощности тепловых источников  $U_T$  поступали следующим образом. При динамическом нагружении образца, после достижения стационарного теплового режима, замерялась разность температур между поверхностью образца  $T_0$  и окружающей средой  $T_c$ , т.е. измерялся так называемый температурный напор  $\Delta T$ . Поскольку образец в процессе работы нагревается неравномерно, то, следовательно, температурный напор  $\Delta T$  будет зависеть от точки поверхности образца.

По законам теплообмена, для бесконечно малого элемента поверхности  $df$ , окружающего точку  $f$ , мощность отвода в окружающую среду  $dU_T(f)$ . Проинтегрировав по поверхности образца, находим  $U_T$ :

$$U_T = \alpha \Delta T_{cp} F, \quad (5)$$

где  $\Delta T_{cp}$  – средний температурный напор,

$$\Delta T_{cp} = \frac{1}{F} \int_F \Delta T(f) df. \quad (6)$$

Обозначив

$$\alpha \cdot F = k, \quad (7)$$

получим

$$U_T = k \Delta T_{cp}. \quad (8)$$

Средний температурный напор  $\Delta T_{cp}$  находился путём усреднения температурных напоров, измеренных в различных точках поверхности образца. Коэффициент  $k$  определялся по методике, описанной в [9].

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1 – табл. 2 и на рисунке 1.

Для сравнения приведены резины марок 43, 169, 51-1562 заимствовано в [1] и футеровочной резины типа А, физико-химические характеристики которых приведены в табл. 2.

График на рис. 1 приведен с целью показать общность процессов разрушения для резины с разным наполнением. Все данные по энергии разрушения учитывались в огибающую кривую  $\frac{U_p \cdot 10^{-3}}{N} \approx \lg N^*$ .

$$N = 1,32 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

$$\Delta U_y^* = 1,18 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

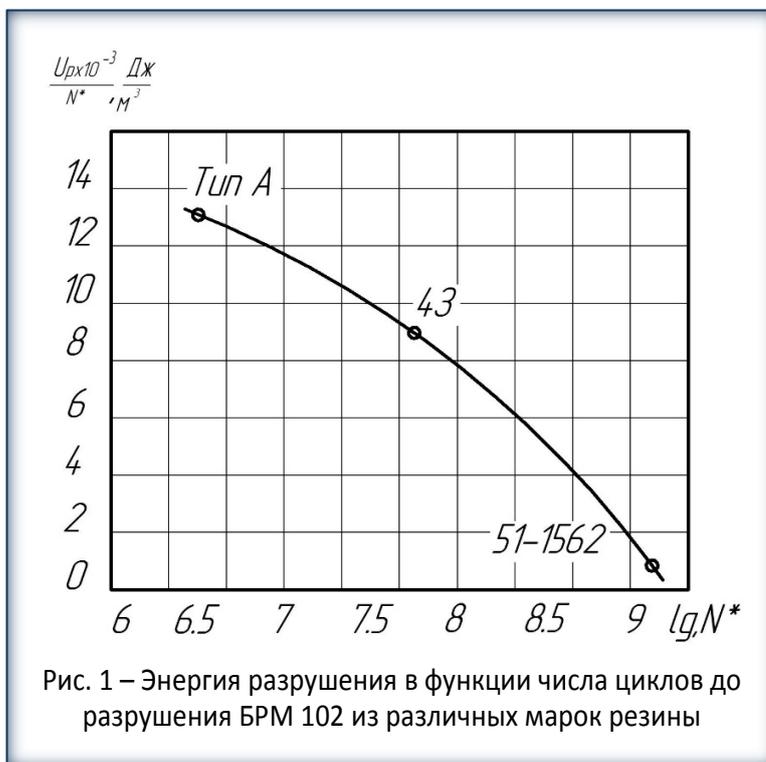


Рис. 1 – Энергия разрушения в функции числа циклов до разрушения БРМ 102 из различных марок резины

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

Величины, ед. измер.	Резины	
	2959	51-1562
$\omega$ , 1/с	51,30	74,9
A, мм	6,0	10,7
F, Н	2766,0	2227,0
$\psi$	0,710	0,1
$\Delta T_{cp}$ , град.	22,20	5,5
V, В	21,60	15,8
R, Ом	20,80	21,7
$\Delta T_{cp}$ , град.	21,70	5,4
$U_T$ , Вт	22,90	11,7
$U_D$ , Вт	48,10	14,2
$\eta$	0,480	0,8

Таблица 2 – Основной состав и механические характеристики резин

Шифр резины	Тип каучука	Наполнение, масс.ч.		$G_0$ , МПа	$G_{дин}$ , МПа	$G_{сж}$ , МПа	$\psi$
		оксид цинка	технич. углерод ТМ-15				
43	СКИ-3	27	34	1,60	1,24	0,90	0,40
169	СКИ-3	5	20	1,50	1,23	0,93	0,30
51-1562	СКИ-3	5	5	0,78	0,72	0,51	0,17
Тип А	СКИ+СКД	15	65	2,38	1,89	1,63	0,59

**Двухкритериальное уравнение долговечности РФ.** Двухкритериальное уравнение основано на вязко-эластичной природе разрушения резин при механическом утомлении и истирании [1, 2].

Для открытых термодинамических систем, обменивающихся энергией с окружающей средой, энергию диссипации  $dU_D$  за время  $dt$  можно разложить на слагаемые (рис. 2) [1, 2]

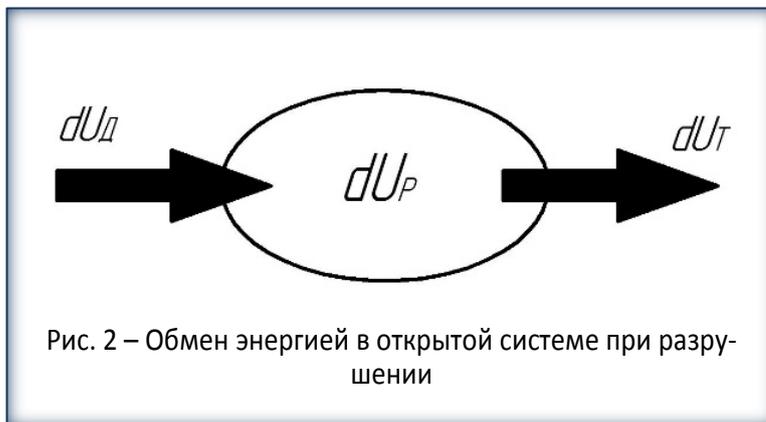
$$dU_D = dU_T + dU_p, \quad (9)$$

где  $dU_T$  – поток тепловой энергии в окружающую среду;

$dU_p$  – энергия, идущая на осуществление необратимых процессов внутри

системы, т.е. на разрушение структуры резины; для всех реальных процессов работа разрушения  $dU_p > 0$ .

Для рассматриваемого случая разрушения резиновой футеровки по абразивно-усталостному механизму для полной энергии разрушения можно записать



$$\Delta U_p = \Delta U_y + \Delta U_{uz}, \tag{10}$$

где  $\Delta U_y$  – энергия, идущая на усталостное разрушение резины в объёме футеровки;

$\Delta U_{uz}$  – энергия, идущая на разрушение поверхностного слоя резины от абразивного износа.

Деформируемую плиту футеровки будем считать термодинамической системой. Известно, что состояние всякой термодинамической системы наиболее полно характеризуется её внутренней энергией. Исходя из этого предположим, что существует взаимно однозначное соответствие между степенью разрушенности системы и её внутренней энергией. Опираясь на это предположение, построим критериальное уравнение разрушения [2].

Запишем первый закон термодинамики для случая, когда на образец действуют деформирующие механические силы и некоторые силы немеханического происхождения, например радиация:

$$\dot{U} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} + \dot{\chi} + \dot{\xi}, \tag{11}$$

где  $\dot{U}$  – внутренняя энергия системы;

$\dot{\chi}$  – энергия немеханического воздействия;

$\dot{\xi}$  – энергия разрушения от абразивного износа (здесь и далее точкой обозначена производная по времени).

Итогом этих воздействий является, как видно, увеличение внутренней энергии системы. Однако всякая система стремится занять состояние с минимальным значением энергии. Поэтому увеличившаяся внутренняя энергия расходуется внутри системы. Согласно первому закону термодинамики, выполнение работы внутри системы направлено на изменение внутренней структуры системы и тепловыделение.

По истечении времени от 0 до  $t^*$  энергетический баланс будет следующим:

$$\Delta U_p^* = \int_0^{t^*} (\sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{q} + \dot{\xi} + \dot{\chi}) dt. \tag{12}$$

Уравнение (12) является критерием длительной прочности и позволяет определить время до разрушения характерного объёма твёрдого тела при известных условиях деформирования и экспериментально найденной константе  $\Delta U_p^*$ .

Примем диссипативную функцию в виде

$$D = \sigma_{ij} \gamma_{ij} = \frac{\omega}{2\mu_1} \left( \sigma_x^{02} + \sigma_y^{02} + \sigma_z^{02} + 2\sigma_{xy}^{02} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma^{02} \right) \times \left( \frac{\mu_2}{\mu_1} \sin^2 \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right), \quad (13)$$

где  $\mu^* = \mu_1 + i \cdot \mu_2$ ;

$\sigma^0 = \sigma_x^0 + \sigma_y^0 + \sigma_z^0$  – напряжения, равные упругим при  $\mu^* = \mu_1$ .

Интегрируя (12) и вводя функцию координат

$$f_1(x, y) = \frac{1}{4a_0^2 \mu_1^2} \left( \sigma_x^{02} + \sigma_y^{02} + \sigma_z^{02} + 2\sigma_{xy}^{02} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma^{02} \right), \quad (14)$$

получаем выражение для первого интеграла в (12) в виде

$$\int_0^{t^*} \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} dt = \frac{\pi a_0^2 \mu_2 h_\phi \delta_m}{2} f_1(x, y) N^*, \quad (15)$$

где  $t^*$  – время работы футеровки до разрушения,

$$t^* = \left( \frac{2\pi}{\omega} \right) N^*, \quad (16)$$

$h_\phi$  – толщина резиновой плиты;

$\delta_m$  – коэффициент асимметрии загрузки.

Если использовать соотношения  $\mu_1 = G_0$ ;  $\mu_2 = G_0 \frac{\psi}{2\pi}$ , то (13) можно привести к виду

ти к виду

$$\int_0^{t^*} \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} dt = \frac{G_0 a_0^2 \psi N^*}{4} f_1(x, y). \quad (17)$$

Это выражение позволяет вычислить первый интеграл в (12) в любой точке рассматриваемого образца.

Известно [1], что в процессе длительного хранения или нагружения реологические характеристики резины не остаются постоянными, а со временем претерпевают изменения. Такие изменения могут происходить и от действия внешней среды: тепла, масел, щелочей, солнечной радиации. В ряде случаев именно они являются основной причиной отказа, т.к. параметры системы могут выйти за пределы допустимых. Такие процессы, как правило, охватывают все механические, химические и электрические явления, которые в своём синергетическом взаимодействии приводят к необратимому изменению структуры резины. Причины временных изменений параметров резины довольно много, но в механике обычно фигурируют две: структурирование и деструкция. Структурирование приводит к увеличению жесткостных характеристик и снижению диссипации, и появлению остаточных деформаций; деструкция связана с разрушением молекулярной сетки и приводит к снижению жёсткости системы. Для исследуемой резины преобладающим является структурирование.

Также известно [1], что со временем параметры резины могут изменяться на 50 % и более и без учёта таких изменений расчёт футеровки, особенно прогнозирование долговечности, будет неполным. При этом наиболее достоверные дан-

ные можно получить в процессе длительного нагружения. Именно такие данные были получены при длительном наблюдении за системой одно-массной зарезонансной машины.

Результаты испытаний представлены на рис. 3, рис. 4. Обработка результатов испытаний проводилась согласно методике [1]; как видно изменения условно-равновесного модуля упругости и динамического модуля упругости происходило по экспоненциальному закону; функциональная зависимость  $E(t)$  может быть принята в виде

$$E_{\infty}(t) = E_{\infty H} + (E_{\infty K} - E_{\infty H}) \exp(k_E t), \quad (18)$$

$$E_g(t) = E_{gH} + (E_{gK} - E_{gH}) \exp(k_E t), \quad (19)$$

где  $E_{\infty H}$  и  $E_{gH}$  – начальные значения соответственно статического и динамического модуля упругости;

$E_{\infty K}$  и  $E_{gK}$  – их конечные значения.

Рассмотрим конкретный пример с использованием виброизолятора ВРМ 903:  $E_{\infty H} = 37,0$  МПа,  $E_{\infty K} = 62,9$  МПа;  $E_{\infty gH} = 48,0$  МПа;  $E_{\infty gK} = 81,6$  МПа, константа скорости  $k_e = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

Функциональная зависимость  $\psi(t)$  практически линейная

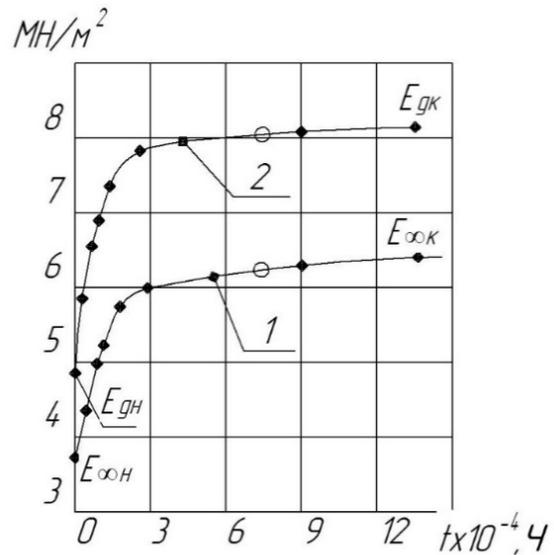
$$\psi(t) = \psi_H - k_{\psi} t, \quad (20)$$

где  $\psi_H$  – начальное значение коэффициента поглощения энергии;  $k_{\psi}$  – константа скорости.

Для рассматриваемого виброизолятора:  $\psi_0 = 0,31$ ;  $k_{\psi} = 0,083 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ .

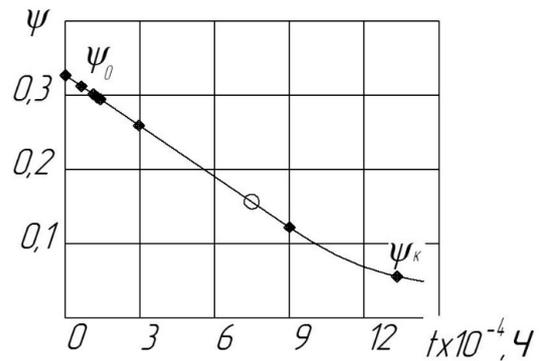
Следует подчеркнуть, что за время эксплуатации виброизоляторов ( $t \cong 15$  лет) модуль упругости изменился примерно на 70 %, а коэффициент диссипации энергии более чем на 300 %, что в целом свидетельствует об изменении структуры материала, изменении его релаксационных свойств и потере способности поглощать энергию механических колебаний.

На практике такие изменения основных параметров резины привели к следующему: система виброизоляции сохраняла эффективность в течение примерно 9-10 лет (около 70-85 тыс. часов); при дальнейшей эксплуатации параметры резины вышли за пределы допускаемых, остаточная деформация виброизолятора со-



$E_{g,H}, E_{\infty,H}, E_{g,K}, E_{\infty,K}$  – начальные и конечные значения статического и динамического модуля сжатия,  $O$  – нижняя граница срока службы виброизолятора

Рис. 3 – Временные зависимости статического  $E_{\infty}$  и динамического модуля сжатия  $E_g$



$O$  – нижняя граница срока службы виброизолятора

Рис. 4 – Временная зависимость коэффициента поглощения энергии

ставила 6 % (6 мм) и система виброизоляции потеряла своё функциональное назначение.

Если параметры резины  $|E^*|$  и  $\psi$  зависят от времени нагружения виброизолятора, то уравнение долговечности можно записать в виде

$$N^* = \frac{\Delta U_g^*}{0,5|E^*(t)|\varepsilon^2\psi(t)}, \quad (21)$$

или

$$\frac{\varepsilon^2}{2} \cdot \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{t^*} |E^*(t)|\psi(t) dt = \Delta U_g^*. \quad (22)$$

Следует отметить, что здесь время до локального разрушения виброизолятора  $t^*$  отождествляется с разрушением центральной области резинового массива.

С учётом эволюционных уравнений (19) и (20) для динамического модуля упругости  $E_g(t)$  и коэффициента диссипации энергии  $\psi(t)$  выражение в (22) получим в виде

$$\begin{aligned} E_{g\kappa}\psi_{\kappa}t^* - \frac{E_{g\kappa}k_E\psi}{2}t^{*2} + \frac{k_{\psi}(E_{g\kappa} - E_{gH})}{k_E^2} \cdot [\exp(-k_E t^*)(k_E t^* + 1) - 1] + \\ + \frac{\psi_{\kappa}(E_{g\kappa} - E_{gH})}{k_E^2} [\exp(-k_E t^*) - 1] = \frac{4\pi}{\varepsilon^2\omega} \Delta U_g^*. \end{aligned} \quad (23)$$

Пренебрегая последними двумя членами уравнения (23) ввиду их малости, получаем

$$E_{g\kappa}\psi_{\kappa}t^* - \frac{E_{g\kappa}k_E\psi}{2}t^{*2} = \frac{4\pi}{\varepsilon^2\omega} \Delta U_g^*. \quad (24)$$

Экспериментальные данные и анализ уравнения (24) показывают, что основной вклад в долговечность виброизолятора вносит изменение коэффициента диссипации энергии; за 15 лет нагружения модуль упругости изменился на 70 %, а коэффициент диссипации более чем на 300 %. Поэтому прогнозирование долговечности можно проводить по формуле [1]

$$\Delta U_p^* = \frac{\eta_p \varepsilon^2 E_{g\kappa} (N^*)}{2} (\psi_0 N^* - k_{\psi} N^{*2}). \quad (25)$$

При таких допущениях критериальное уравнение (21) для центральной области плиты футеровки можно записать в более упрощённом виде

$$t^* = N^* = \frac{\eta_{\phi} \delta_M \Delta U_p^*}{0,5|E^*|\varepsilon^2\psi\eta_p}, \quad (26)$$

где  $\eta_p = 1 - \eta_T$  – коэффициент, характеризующий часть энергии, идущей непосредственно на разрушение структуры резины.

Тогда получаем

$$N^* = \frac{\eta_{\phi} \delta_M \Delta U_p^*}{0,5|E^*|\varepsilon^2\psi}, \quad (27)$$

где  $\Delta U_0^*$  – критическое (допускаемое) значение плотности энергии, диссипируемой в плите футеровки при нагружении.

Следует отметить, что здесь время до локального разрушения плиты футеровки  $t^*$  отождествляется с разрушением центральной области резинового массива.

**Исследование абразивно-усталостного износа резиновых футеровок.** При использовании резиновой футеровки в рудоизмельчительных мельницах возникает ряд проблем, среди которых наиболее важными являются следующие: выбор подходящей марки резины, выбор оптимальной формы и геометрических размеров элементов РФ и определение её долговечности. Известно [3], что доминирующим механизмом разрушения футеровок для шаровых мельниц и мельниц мокрого самоизмельчения является усталостно-гидродарно-абразивный износ; в известной литературе [3] принят термин «абразивно-усталостный» износ, этого термина и будем придерживаться в настоящей работе. Усталостное разрушение резин достаточно подробно изложено в работах [1, 2]. Что же касается абразивно-усталостного разрушения поверхностного слоя РФ, то эта проблема является весьма сложной и, несмотря на усилия многих исследователей, до сегодняшнего дня остаётся практически нерешённой даже при рассмотрении единичного акта истирания.

Абразивно-усталостное разрушение РФ в целом представляет собой весьма сложный многофакторный, нелинейный процесс, протекающий одновременно по нескольким механизмам. Если же учесть, что эти механизмы будут различны для различного типа мельниц, грансостава перерабатываемого сырья, его крупности и абразивности, скорости движения в барабане и многих других факторов, то задача определения долговечности РФ существенно усложняется.

Все это приводит исследователей к весьма важному выводу: для оценки механизмов разрушения РФ необходима интегральная величина, т.е. интегральный информационный параметр, наиболее полно характеризующий разрушение футеровки в целом [5], такой интегральной величиной может служить энергия разрушения от абразивно-усталостного механизма износа. Такой приём в последние годы получил довольно широкое распространение, как для резин [3], так и для других материалов.

Как видно, все изложенные теории, физические модели и математическая интерпретация результатов экспериментальных исследований, как правило, рассматривают процесс износа избирательно; во всех случаях только один доминирующий механизм рассматривается подробно, а все остальные механизмы, неизбежно при этом присутствующие, либо заведомо не учитываются, либо о них упоминается как об известном факте. Такая постановка вопроса вполне правомерна; более того, только при таком подходе можно углублённо рассмотреть физико-химическую сторону основного механизма износа, например, для уплотнений, сальников и т.д. Для РФ и КГШ такой подход не совсем приемлем, вернее, приемлем в ограниченных случаях, когда необходимо рассмотреть какой-либо доминирующий механизм износа для конкретных целей: выбора марки резины или для рассмотрения характеристики износа РФ при эксплуатации мельниц в специфических условиях (сухое измельчение, агрессивная среда и т.д.). Во всех остальных

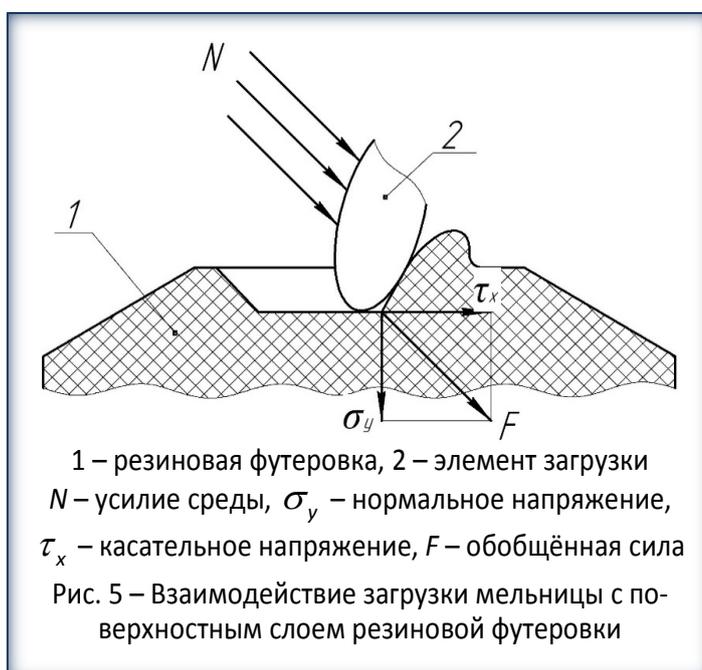
случаях необходимо рассматривать синергетический эффект износа материала от действия многих механизмов: абразивного износа, удара, вдавливания контртел в поверхность резины, усталости, старения, влияния температуры и т.д. Все эти механизмы в своём взаимно-функциональном взаимодействии и порождают обобщённый механизм разрушения от износа резины, как в объёме, так и на поверхности. Следует также учитывать эффект эмерджентности: т.е. два механизма, действуя совокупно, приводят совершенно к разным скоростям разрушения РФ, чем в случае, когда они действуют порознь.

Таким образом, абразивно-усталостное разрушение РФ в целом представляет собой весьма сложный многофакторный, нелинейный процесс, протекающий одновременно по нескольким механизмам. Если же учесть, что эти механизмы будут различны для различного типа мельниц, грансостава перерабатываемого сырья, его крупности и абразивности, скорости движения в барабане и многих других факторов, то задача определения долговечности РФ существенно усложняется.

Все это приводит исследователей к весьма важному выводу: для оценки механизмов разрушения РФ необходима интегральная величина, т.е. интегральный информационный параметр, наиболее полно характеризующий разрушение футеровки в целом. По мнению авторов [3] такой интегральной величиной может служить энергия разрушения от абразивно-усталостного механизма износа. Такой приём в последние годы получил довольно широкое распространение, как для резин [3], так и для других материалов.

**Феноменологическая модель абразивного износа РФ.** При взаимодействии технологической загрузки с резиновой футеровкой острые и твёрдые контртела (шары и частицы перерабатываемого материала) вдавливаются в резину под определённым углом и некоторое время находятся в контакте с её поверхностным слоем. Впереди острого выступа контртела резина находится в сжатом состоянии, а позади – испытывает большие деформации растяжения, что приводит к раздиру резины и образованию полос, которое по направлению совпадают с направлением скольжения.

Именно наличие продольных полос на поверхности истирания является внешним проявлением абразивного вида износа. При этом в месте контакта возникают большие напряжения, приводящие к разрушению локальных объёмов резины, к порезам (собственно к раздиру) и к массопереносу частиц резины, т.е. к отделению частиц материала и выносу их с барабана охлаждающей жидкостью. В локальном объёме резины возникает сложное напряжённое состояние, которое в простейшем случае сле-



дую модели Герца – Динника можно свести к нормальным напряжениям  $\sigma_y$  и касательным  $\tau_x$  (рис. 5). Интенсивность абразивного износа определяется величиной нагрузки, твёрдостью и остротой выступов контртел, углом атаки и механическими характеристиками резины. Как видно, механизм абразивного износа довольно сложен; следует также учитывать нелинейность и стохастичность этого процесса и тот факт, что резина в поверхностном слое имеет степень повреждённости намного больше, чем в объёме [1].

Таким образом, абразивный износ резины можно представить как процесс механического отрыва некоторых частиц (агрегатов) материала и износостойкость при этом, естественно, будет обусловлена прочностными свойствами резины. Износостойкость также будет зависеть от температуры и в целом, как и прочность резины, будет следовать концепции температурно-временной суперпозиции. Этот факт имеет довольно важное значение, т.к. он указывает на общую вязкоэластичную природу разрушения резин при механических разрывах и истирании, что позволяет для описания процесса применять одни и те же физические модели, алгоритмы расчёта и критерии разрушения.

**Определение энергии разрушения при абразивном износе резин.** Как уже отмечалось [3], разрушение резиновых футеровок барабанных мельниц происходит по абразивно-усталостному механизму. Рассмотрим абразивную составляющую этого довольно сложного многопараметрического процесса. Известно [3], что в основе абразивного износа лежат следующие составляющие:

- износ, обусловленный разрушением внутренних когезионных связей материала;
- адгезии, обусловленной молекулярными силами;
- деформации, обусловленной преимущественно диссипативными силами.

Современные возможности эксперимента позволяют выделить в основном адгезионную составляющую износа, которая обусловлена разрывом «молекулярных агрегатов» резины, находящихся в контакте с контртелом. Ниже будет использоваться термин «агрегат резины», более подходящий для процесса макроразрушения при абразивном износе резиновой футеровки.

Согласно термофлуктуационной концепции прочности, элементарный акт разрушения происходит из-за «накачки энергии из окружающей среды в разрушающуюся флуктуацию плотности – дилатон». Такая дилатонная модель с единых позиций удовлетворительно объясняет и вязкое разрушение резин и хрупкое разрушение металлов. Имеется ещё один важный аспект этой модели: она с позиций фундаментальной теории прочности подтверждает прочностную природу износостойкости конструкционных материалов, в рассматриваемом случае резин, что вполне оправдывает применение в настоящей работе энергетической концепции абразивного износа.

Реализация данной концепции возможна с принятием определённых допущений, которые подробно рассмотрены в [3].

**Энергетический критерий разрушения резины при абразивном износе.** В случае отрыва агрегата резины от матрицы, предполагается, что функция релаксации резины  $r(t)$  известна (т.е. известны механические параметры резины) и между нагрузкой и футеровкой существует однородное относительное движение, в большинстве случаев с постоянной и ограниченной малыми величинами скоро-

стью –  $V$ , то, используя интеграл Больцмана, можно получить уравнение силы связи для элементарного агрегата резины и затем определить силу трения (износа) как среднее значение сил связи.

Пусть  $n$  – общее число агрегатов, подвергающихся действию сил связи вблизи поверхности контакта;  $n_0$  и  $n_1$  – число агрегатов соответственно в связанном и свободном (т.е. после разрыва) состоянии;  $t_0$  и  $t_1$  – время, в течение которого агрегат находится соответственно в связанном и свободном состоянии; эти величины связаны статистическими соотношениями

$$\frac{n_0}{t_0} = \frac{n_1}{t_1} = \frac{n}{t_0 + t_1}. \quad (28)$$

Предположение, что время, в течение которого агрегат находится в свободном состоянии, пропорционально времени релаксации  $\tau$  агрегата,

$$t_1 = a\tau, \quad (29)$$

где  $a$  – некоторая постоянная.

Будет справедливо, если принять, что время, необходимое для достижения агрегатом известного динамического уровня, пропорционально  $\tau$ , а смещение при этом будет пропорционально скорости  $V$ .

С учётом приведённых предположений, силу связи  $f(t)$  агрегатов определим, пользуясь интегралом Больцмана

$$f(t) = V \int_0^t r(t-t') dt'. \quad (30)$$

Динамический предел связи  $f_0$  одного агрегата резины можно определить экспериментально, исходя из величины трения при скоростях, близких к скорости при нулевом скольжении (например, при применении смазки) из выражения

$$f_0 = \frac{2F(0)}{n_0}, \quad (31)$$

где  $F(0)$  – сила трения при нулевом скольжении.

Предполагая, что связь между агрегатами резины исчезает, когда сила достигает величины  $f_0$ , уравнение (30) можно записать в виде

$$f(t_0) = f_0. \quad (32)$$

В этом случае общая сила трения как среднее значение сил связи агрегатов, находящихся в контакте с контртелом, будет

$$F = \frac{n_0}{t_0} \int_0^{t_0} f(t) dt. \quad (33)$$

Положим [5], что резина характеризуется функцией релаксации вида

$$r(t) = E_0 (1 - be^{-t/\tau}), \quad (34)$$

где  $E_0$  – модуль упругости резины;

$\tau$  – время релаксации;

$b$  – некоторая постоянная;

$t$  – текущее время.

Элементарную силу связи каждого агрегата определяют при заданном виде релаксационной функции (28) из выражения

$$f(t) = vtE_0 + \tau vbE_0 - vbE_0 \tau e^{-t/\tau}. \quad (35)$$

Вводя обозначения

$$L = v \cdot \tau \text{ и } \alpha = \frac{t}{\tau}, \quad (36)$$

где  $L$  – длина релаксации агрегата молекул материала;  
 $\tau$  – время релаксации.

Зависимость (35) будет иметь вид

$$f(t) = LE_0 [\alpha + b(1 - e^{-\alpha})]. \quad (37)$$

Величины  $\tau$  и  $L$  (по порядку значений) совпадают: длина релаксации  $L$  – со средней длиной свободного пробега агрегатов резины, а время релаксации  $\tau$  – со средним временем их свободного пробега.

С учётом принятых обозначений (36), из условий (32)

$$f_0 = f(t - t_0) = E_0 L [\alpha_0 + b(1 - e^{-\alpha_0})], \quad (38)$$

и пользуясь уравнением высшего порядка

$$L = \frac{f_0}{E_0} [\alpha_0 + b(1 - e^{-\alpha_0})]^{-1}, \quad (39)$$

можно определить  $t_0$  (а также  $\alpha_0$ ).

Сила трения  $F$ , как общая сила, определится усреднением сил связи агрегатов резин по формуле

$$F = \frac{n_0}{t_0} \int_0^{t_0} f(t) dt. \quad (40)$$

После интегрирования уравнение общего трения будет иметь вид

$$F = \frac{n_0 E_0 L}{\alpha_0} \left[ \frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1) \right], \quad (41)$$

или с учётом (28)

$$F = \frac{n E_0 L}{\alpha_0 + a} \left[ \frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1) \right]. \quad (42)$$

При исследовании изменения адгезионной составляющей трения в зависимости от скорости скольжения  $F(L)$ , достаточно исключить  $\alpha_0$  совместным решением уравнений (39) и (42) и исследовать получаемые таким образом результаты. С учётом изложенного можно утверждать следующее: энергетический  $\psi$ -критерий разрушения резины, постулирующий, что разрыв связи агрегата с матрицей происходит, когда энергия, накопленная агрегатом во время износа резины, достигает некоторого критического значения  $U_0$ , определяет величину  $t_0$  согласно уравнению

$$U_0 = V \int_0^{t_0} f(t) dt, \quad (43)$$

или с учётом (33), (36)

$$U_0 = \frac{V t_0 F}{n_0}. \quad (44)$$

Согласно принятой пропорциональности

$$\frac{n_0}{t_0} = \frac{n}{t_0 + t_1} = \frac{n}{\alpha_0 \tau + a \tau} = \frac{n}{\tau(\alpha_0 + a)}, \quad (45)$$

зависимость (44) преобразуется к виду:

$$U_0 = \frac{L(\alpha_0 + a)}{n} F, \quad (46)$$

или через силу трения

$$F = \frac{nU_0}{L(\alpha_0 + a)}. \quad (47)$$

Для резины, функция релаксации которой имеет вид (34), с учётом вычисленного интеграла (42), выражение для параметра  $L$  по зависимостям (46) или (47) будет

$$L = \sqrt{\frac{U_0/E_0}{\frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1)}}. \quad (48)$$

Исследование изменения силы трения  $F$  как функции скорости  $F(L)$  проводят решением приведённой ниже системы уравнений

$$\begin{cases} L = \sqrt{\frac{U_0/E_0}{\frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1)}}; \\ F = \frac{nU_0}{L(\alpha_0 + a)}. \end{cases} \quad (49)$$

Таким образом, для наполненных резин, используемых в качестве защитных футеровок барабанных рудоизмельчительных мельниц, при абразивно-усталостном механизме износа определение энергии разрушения целесообразно проводить по формуле (44) при известной релаксационной кривой и экспериментально найденных параметрах износа модельных образцов.

Экспериментальные исследования. Исследования проводились согласно [3]. Использовался экспериментальный стенд МИ-2 и стандартные образцы из футеровочной резины типа А размером 20×20×8 мм; образцы присоединялись к специальной рамке-держателю и истирались на шлифовальной шкурке (по ГОСТ 344-74). Обработка результатов эксперимента проводилась по девяти опытам. Полученные таким образом результаты были следующие:

- сила трения  $F = 16$  Н;
- время истирания  $t = 164$  с;
- скорость истирания  $V = 0,279$  м/с;
- количество частиц износа  $n = 6,0 \cdot 10^3$  (усреднённое значение по результатам девяти испытаний; усреднённая масса частиц – 0,5 г; при усреднённом диаметре частиц  $d = 0,4$  мм количество частиц в одном кубическом метре  $n^* = 22 \cdot 10^9$  1/м<sup>3</sup>).

В этом случае энергия разрушения для одного фрагмента резины (т.е. энергия отделения его от матрицы) будет

$$U_0 = \frac{F \cdot V \cdot t}{n} = \frac{16 \cdot 0,279 \cdot 164}{6,0 \cdot 10^3} = 122 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.} \quad (50)$$

Плотность энергии разрушения от абразивного износа, т.е. энергия разрушения в единице объёма материала, будет

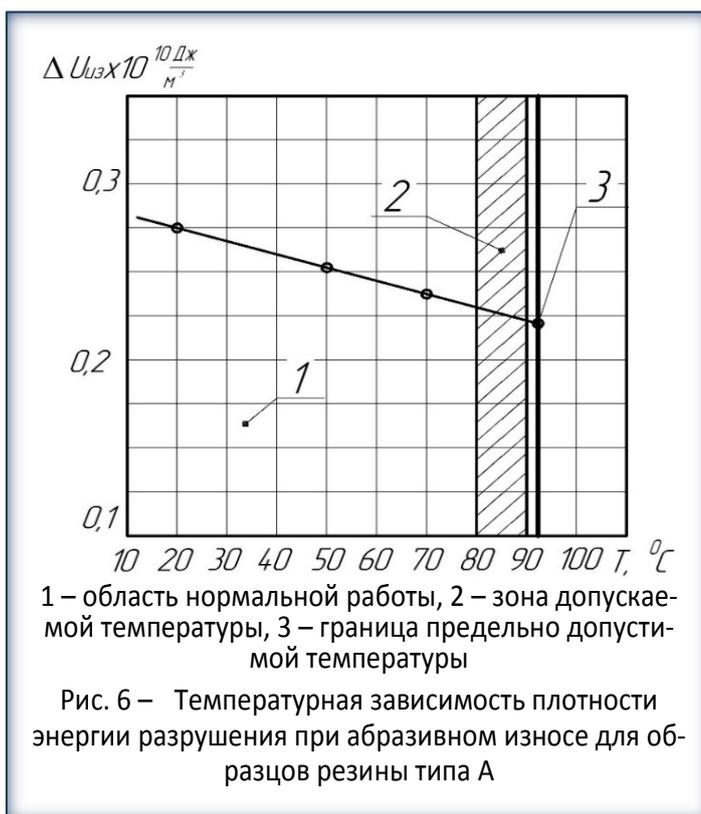
$$\Delta U_{\text{из}} = U_0 \cdot n^* = 122 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \cdot 10^9 = 0,27 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3. \quad (51)$$

Важным параметром экспериментальных исследований является количество и размеры агрегатов резины при абразивном износе образцов. Абразивный механизм износа резины подтверждался наличием параллельных полос на поверхности резины [3], а количество и линейный размер подбором шлифовальной шкурки по ГОСТ 344-74. В процессе подбора параметров износа добивались диаметра агрегатов примерно (0,35-0,42) мм, т.е. с такими линейными размерами, которые соответствовали аналогичным частицам, полученным в барабанных мельницах при разрушении реальной резиновой футеровки. Следует отметить, что агрегаты резины имели вид неправильного шара диаметром (0,3-0,42) мм (линейные размеры и количество определялись с помощью инструментального микроскопа); примерно (9-12) % агрегатов имели диаметр (0,1-0,2) мм (в реальной мельнице наблюдалось примерно такое же распределение агрегатов по крупности). Такой разброс вполне закономерен и объясняется структурой резины, технологическими особенностями изготовления футеровки, стохастической природой износа и т.д.

В дальнейших расчётах для резины типа А принималась усреднённая величина диаметра агрегатов ( $d_a = 0,4$  мм). Такое допущение не искажает общего определения энергии разрушения резины от абразивного износа и находится в рамках уже принятых допущений.

Экспериментальные исследования показывают, что даже для материала из одной партии плит резиновой футеровки плотность энергии разрушения находится в пределах  $(0,22 \div 0,28) \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3$ , что вполне объяснимо, учитывая стохастический характер износа и технологические факторы. Влияет на величину энергии разрушения также и температура внешней среды. На рис. 6 показана такая зависимость для исследуемой резины тип А. Данные получены для модельных образцов; температура замерялась хромель-копелевыми термомпарами. Как видно, в диапазоне температур (20-90) °С плотность энергии разрушения с определёнными допущениями можно принимать независимой от температуры внешней среды.

Таким образом, можно счи-



тать, что для резины типа А получена плотность энергии разрушения, и при температурах  $T \leq [T]$  её можно считать постоянной материала; для дальнейших расчётов долговечности реальных конструкций резиновых футеровок при абразивно-усталостном механизме износа будет принята следующая величина энергии разрушения  $\Delta U_{из} = 0,27 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>.

**Пример расчёта.** Расчёт долговечности или времени  $t^*$  до разрушения резиновой футеровки будем проводить согласно структурно-синергетической модели абразивно-усталостного (точнее усталостно-гидроабразивного) разрушения, изложенной выше. Для реальных условий эксплуатации РФ в мельницах типа МШЦ локальная долговечность составляет

$$t^* = (0,85 \div 0,90) t_3^*, \quad (52)$$

где  $t_3^*$  – эксплуатационное время, определяемое по установленным критериям отказа.

Так, например, для конструкций РФ фирмы ООО «ВАЛСА-ГТВ» установлены следующие критерии отказа: резиновые футеровки эксплуатируются в нормальном режиме до остаточной толщины  $[\Delta h] = (35 \div 40)$  мм и до  $[\Delta h] = (20 \div 25)$  мм в аварийном режиме: дальнейшая эксплуатация РФ может привести к повреждению барабана мельницы. Такие критерии выработаны практикой длительной эксплуатации барабана мельниц и достаточно хорошо согласуются с критериями отказа других предприятий.

Предпосылкой для расчёта локальной долговечности  $t^*$  помимо общих теоретических моделей служат также кривые износа РФ, полученные при многолетних экспериментальных наблюдениях. На рис. 7 показана такая кривая износа для РФ типа «плита–плита», установленной в мельнице МШЦ 3,6×5,5.

Точка F соответствовала локальной долговечности РФ, т.е.  $t^* = 0,87 t_3^*$  ( $t^* = 23490$  ч,  $t_3^* = 27000$  ч); точка А соответствовала износу при остаточной толщине РФ  $[\Delta h] = 40$  мм, т.е. при нормальном режиме эксплуатации; точка В соответствовала износу при остаточной толщине РФ  $[\Delta h] = 27$  мм, т.е. при работе мельницы в предаварийном режиме; после этого РФ была демонтирована. Время наработки РФ на отказ для конкретной мельницы составило  $t_3^* = 27000$  ч; для мельниц рассматриваемого типа эксплуатационная долговечность РФ на отказ составляла  $(26 \div 28) \cdot 10^3$  ч.



Рис. 7 – Экспериментальная кривая износа резиновой футеровки мельницы МШЦ 3,6×5,5

Длительная практика эксплуатации позволила установить довольно важный экспериментальный факт: для барабанных мельниц типа МШЦ диаметром (3,6÷5,5) м имеют место эпизодические контакты шаров непосредственно с РФ. Частота этих контактов зависит от диаметра мельницы, диаметра шаров, толщины РФ и в значительной степени зависит от степени заполнения барабана мельницы шаровой загрузкой. При экспериментальных наблюдениях установлено, что в рассматриваемых мельницах при оптимальном заполнении барабана шаровой загрузкой количество ударов шаров о РФ составляет примерно (3÷5) % от общего объёма шаров. С уменьшением объёма шаровой загрузки количество ударов увеличивается и соответственно увеличивается степень риска прямых ударов шаров о РФ. Таким образом, при соблюдении правил эксплуатации мельниц, т.е., прежде всего, при оптимальном заполнении барабана шаровой загрузкой, с некоторым допущением можно считать, что удары шаров о РФ не определяют её долговечность; основной вклад в усталостный процесс разрушения резины вносит вдавливание шаровой загрузки и перерабатываемого материала в поверхность РФ, т.е. абразивно-усталостный износ.

Монодисперсоид рудно-шарового тела оказывает на РФ динамическое давление с частотой, соответствующей частоте вращения барабана. При этом РФ в простейшем случае испытывает нормальные и касательные напряжения; в связи с волновым характером износа резины в дальнейшем будем рассматривать преимущественно нормальные напряжения, которые вызывают деформацию сжатия футеровочных плит. Учитывая сложнапряжённое состояние плит и стохастичность динамической нагрузки, их корректный расчёт весьма сложен. Инженерные методы расчётов дают погрешность (20-30) % [3]. Поэтому наиболее целесообразно определить величину деформации плит при экспериментальных исследованиях. С этой целью к рабочей поверхности РФ прикреплялась металлическая пластина и через отверстие в барабане и РФ замерялась высота плит в свободном состоянии и оптимальной загрузке. Динамическая деформация плит определялась как

$$\Delta_{\partial} = \Delta_{cm} k_{д}, \quad (53)$$

где  $\Delta_{cm}$  – статическая деформация плиты;

$k_{д}$  – коэффициент динамичности резины; для частот 0,1÷6,0 Гц

$k_{д} = (1,35-1,50)$ .

Для рассматриваемой в настоящем примере мельницы МШЦ 3,6×5,5 максимальная динамическая деформация сжатия плит была в пределах (5,5÷6,8) мм; в дальнейших расчётах принималось усреднённое значение динамической деформации  $\Delta_{\partial} = 6,4$  мм (для плиты высотой 160 мм относительное сжатие  $\varepsilon = 0,04$ ).

При взаимодействии РФ с монодисперсоидом загрузки в резиновом массиве за счёт процесса истирания и диссипации энергии от динамического нагружения возникало температурное поле. Вследствие стохастичности процесса переработки материала и циркуляции жидкости такое температурное поле, как правило, не являлось стационарным; температура по объёму плит распределялась так, как показано на рис. 8.

Экспериментально температура замерялась с помощью хромель-копелевых термопар, установленных в разных точках плиты, а также игольчатой термопарой,

вводимой эпизодически в резиновый массив через отверстие в барабане. Температура замерялась при остановке мельницы. Максимальная температура в исследуемой РФ наблюдалась на глубине примерно (12-20) мм от рабочей поверхности и равнялась  $(62 \div 67)^\circ\text{C}$ ; температура жидкости на выходе из барабана была  $(45-55)^\circ\text{C}$ ; точность измерений  $\pm 3^\circ\text{C}$ .

Физико-механические характеристики резины определялись на модельных образцах типа БРМ 101 по изложенным выше методикам.

Постоянные, характеризующие особенности конструкции РФ определялись следующим образом:

- коэффициент  $\eta_\phi$ , характеризующий профиль РФ, находится как соотношение долговечности трапециевидных плит с нишами; экспериментально было установлено, что долговечность трапециевидных плит на  $(12 \div 20)\%$  больше, чем гладких плит, поэтому было принято как  $\eta_\phi = 1,12 \div 1,20$ ;
- коэффициент  $\delta_m$ , характеризующий влияние несимметрии загрузки по длине мельницы был принят, как соотношение долговечности РФ для зоны умеренного износа и зоны интенсивного износа (в зоне умеренного износа долговечность РФ была на  $(10-12)\%$  выше, чем в зоне интенсивного износа); поэтому и величина коэффициента для зоны принятого износа была принята  $\delta_m = 1,12$ .

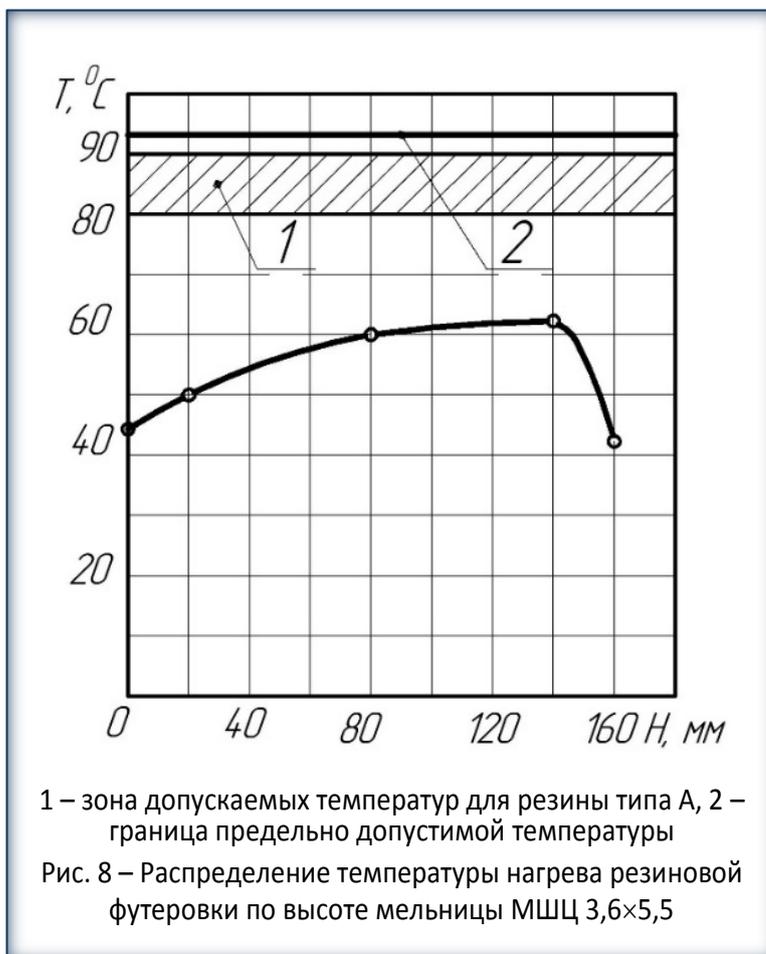
#### Данные для расчёта.

1. Мельница МШЦ 3,6×5,5; шаровая загрузка – шары диаметром 40 мм; скорость вращения барабана  $\omega = 19,8$  об./мин ( $\omega/60 = 0,33$  циклов/с).

2. Резиновая футеровка ООО «ВАЛСА ГТВ»; плиты трапециевидной формы с нишами, максимальная высота плит  $h_\phi = 160$  мм; экспериментально найденная усреднённая деформация плит  $\Delta_\phi = 6,4$  мм (относительное сжатие  $\varepsilon = 0,041$ );  $\eta_\phi = 1,20$ ;  $\delta_m = 1,12$ .

3. Резина типа А со следующими физико-механическими характеристиками: динамический модуль Юнга  $E_\phi = 5,4 \cdot 10^6$  Па; коэффициент диссипации энергии  $\psi = 0,56$ ; коэффициент  $\eta_T = 0,78$ ; функция распределения полей напряжения и деформации согласно расчёту по методике [1, 2]  $f(x, y, z) = 1,23$ .

4. Экспериментально найденная суммарная энергия разрушения РФ при абразивно-усталостном механизме износа



$$\Delta U_p^* = \Delta U_y^* + \Delta U_{uz}^* = (1,34 + 0,27) \cdot 10^{10} = 1,61 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3. \quad (54)$$

С учётом этих данных количество циклов до локального разрушения резиновой футеровки можно определить по зависимости

$$N^* = \frac{\delta_m \cdot \eta_\phi \cdot \Delta U_p^*}{0,5 \cdot E_\partial \cdot \varepsilon^2 \cdot \psi \cdot (1 - \eta_T) \cdot f(x, y, z)} = \frac{1,12 \cdot 1,2 \cdot 1,61 \cdot 10^{10}}{0,5 \cdot 5,4 \cdot 10^6 \cdot 0,041^2 \cdot 0,56 \cdot 0,22 \cdot 1,23} = 0,315 \cdot 10^8 \text{ ЦИКЛОВ} \quad (55)$$

или

$$t^* = \frac{N^*}{\omega} = \frac{0,315 \cdot 10^8}{0,33} = 0,955 \cdot 10^8 \text{ с} = 26527 \text{ ч}. \quad (56)$$

Экспериментально найденная локальная долговечность РФ составляет 23490 ч (см. рис. 6); эксплуатационная долговечность РФ в нормальном режиме составляет 27000 ч. Как видно, совпадение расчётных и экспериментальных данных вполне удовлетворительное. Такое совпадение не является случайным: все физико-механические характеристики резин определялись экспериментально; за параметрами РФ в реальной мельнице велось постоянное наблюдение с фиксацией экспериментальной кривой износа; расчёт проводился для зоны умеренного износа.

При использовании приведённого алгоритма в случае отсутствия достоверных информационных параметров (например, при прогнозировании долговечности РФ из новой марки резины, или новых конструкций футеровочных плит) погрешность, безусловно, будет несколько больше

### Выводы

1. Построена физическая модель абразивно-усталостного износа резиновой футеровки барабанной мельницы.

2. Построен алгоритм определения энергии разрушения резины от абразивно-усталостного износа.

3. Для резины типа А получена плотность энергии разрушения и при температурах  $T \leq [T]$  её можно считать постоянной материала; для дальнейших расчётов долговечности реальных конструкций резиновых футеровок при абразивно-усталостном механизме износа будет принята следующая величина энергии разрушения  $\Delta U_{uz} = 0,27 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3$ .

4. На примере мельницы МШЦ 3,6×5,5, футерованной резиной типа А, установлена экспериментальная и расчётная долговечность, которые соответственно равны 27000 ч и 26527 ч, что свидетельствует об их удовлетворительном совпадении и о возможности применения разработанной методики расчёта параметров и долговечности резиновой футеровки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная механика упруго-наследственных сред / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров. – К.: Наук. думка, 2011. – 568 с.
2. Прикладная механика упруго-наследственных сред / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – Т. 2. Методы расчёта эластомерных деталей. – К.: Наук. думка, 2012. – 616 с.
3. Дырда, В.И. Резиновые футеровки технологических машин / В.И. Дырда, Р.П. Зозуля. – Москва – Днепропетровск, 2013. – 236 с.

4. Дырда, В.И. Определение соотношения тепловых и механических потерь в резине / В.И. Дырда, Г.Н. Голуб // Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – Днепропетровск, 1982. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 03.03.82, № 1952-82.
5. Болотин, В.В. Введение в теорию и практику надёжности / В.В. Болотин // Конструирование машин. Справочно-методическое пособие: Под общей ред. К.В. Фролова. – Т. 2. Под ред. А.П. Гусенкова, А.Ф. Крайнева. – М.: Машиностроение, 1992. – С. 521-545.
6. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

#### REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, Ye.L. and Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugogo-nasledstvennykh sred. Tom 1. Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya elastomerov* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 1. Mechanics of deformation and fracture of elastomers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, Ye.L. and Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugogo-nasledstvennykh sred. Tom 2. Metody raschota elastomernykh detaley* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Methods for calculating elastomer parts], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
3. Dyrda, V.I. and Zozulya, R.P. (2013), *Rezinovyye futerovki tekhnologicheskikh mashin* [Rubber linings of technological machines], Dnepropetrovsk, Ukraine.
4. Dyrda, V.I. and Golub, G.N. (1982), *Opredelenie sootnosheniya teplovykh i mehanicheskikh poter v rezine* [Determination of a proportion calorific and mechanical losses in gum], Dnepropetrovsk, USSR. Dep. v VINITI 03.03.82, № 1952-82.
5. Bolotin, V.V. (1992), *Vvedenie v teoriyu i praktiku nadyozhnosti. Tom 2. Konstruirovaniye mashin. Spravochno-metodicheskoye posobie* [The introducing in the theory and practice of reliability. Vol. 2. Constructioning of machines. The Reference benefit], Mashinostroenie, Moscow, USSR, p. 521-545.
6. Bolotin, V.V. (1990), *Resurs mashin i konstrukticii* [Resource of machines and constructions]: Mashinostroenie, Moscow, Russia.

---

#### Об авторах

**Калганков Евгений Васильевич**, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина

---

#### About the authors

**Kalgankov Evgeniy Vasilyevich**, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine