

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надутый В.П., Гринюк Т.Ю. Определение зависимостей содержания самородной меди в базах от массы и крупности проб // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – № 26. – С. 87-93.
2. Міденосні лавобрежчій в трапах Волині та механізм їх утворення / В.Г. Мельничук, В.В. Матеюк, Я.О. Косовський, М.В. Федорчук // Геологічна наука та освіта в Україні на межі тисячоліть: стан, проблеми, перспективи. Матер. наук. конф. – Львів: ЛНУ, 2000. – С. 115-116.
3. Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. Малая выборка. – М.: Статистика, 1978. – 248 с.
4. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.

УДК 622.23.05459

Маркелов А.Е.

**ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНО-УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА
РЕЗИНОВЫХ ФУТЕРОВОК БАРАБАННЫХ
РУДОИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МЕЛЬНИЦ**

Розглядається модель і алгоритм розрахунку енергії руйнування гумових футеровок барабанних млинів.

**EXPLORATION OF AN ABRASIVE-FATIGUE WEAR OF RUBBER
LININGS OF TUMBLING MILLS**

The model and algorithm of calculation of a crushing energy of rubber linings of tumbling mills are considered.

Постановка проблеми. При использовании резиновой футеровки (РФ) в рудоизмельчительных мельницах возникает ряд проблем, среди которых наиболее важными являются следующие [1-72]: выбор подходящей марки резины, выбор оптимальной формы и геометрических размеров элементов РФ и определение ее долговечности. Известно [1, 2], что доминирующим механизмом разрушения футеровок для шаровых мельниц и мельниц мокрого самоизмельчения является усталостно-гидроударноабразивный износ; в известной литературе [1] принят термин «абразивно-усталостный» износ, этого термина и будем придерживаться в настоящей работе. Усталостное разрушение резин достаточно подробно изложено в работах [3, 53]. Что же касается абразивно-усталостного разрушения поверхностного слоя РФ, то эта проблема является весьма сложной и, несмотря на усилия многих исследователей, до сегодняшнего дня остается практически нерешенной даже при рассмотрении единичного акта истирания. В известной литературе имеются полуэмпирические формулы; часть из них рассматривается ниже. Вместе с тем отсутствует физическая модель и соответствующая ей теория, позволяющая на основе прямых экспериментальных методов определять такой важный параметр как долговечность РФ. Настоящая статья является продолжением работ в этой области [2]; в ней на основе энергетического подхода излагается алгоритм определения энергии, идущей на разрушение РФ от абразивного износа поверхностного слоя, непосредственно контактирующего с мельничной загрузкой.

Анализ исследований. Проблеме трения и износа резины посвящена многочисленная литература [1-72]. В разное время этой проблемой занимались: И.В. Крагельский, М.М. Резниковский, Г.М. Бартенев, Д.Н. Гаркунов, В.Ф. Евстратов, Н.С. Пенкин, В.Г. Копченков, Е.Ф. Непомнящий, Е.Ф. Чижик, П.А. Ковалев, М.М. Хрущов и другие; из зарубежных исследователей: Шалламах, Мур, Палмгрен, Нильсон, Утияма, Грош и другие.

Первые работы по исследованию трения и износа полимеров и резины относятся к первой половине XX века. В 1941 году вышла книга И.В. Крагельского «Трение волокнистых веществ», в которой дан обзор работ до 1940 г., приведены зависимости, связывающие коэффициент трения со скоростью износа, давлением, твердостью и модулем упругости резины [13, 15]. В 1972 году вышла обзорная статья [27] того же автора, в которой рассматриваются различные теории трения и изнашивания материалов. При этом автор, отмечая общность механизмов внешнего трения и изнашивания, предлагает рассматривать их раздельно. В 2004 году в работе [49] Е.Ф. Чижик дал обзор работ в рассматриваемой области преимущественно для гидроабразивного механизма износа резин.

В дальнейшем, следуя концепции И.В. Крагельского, природу внешнего трения резин и их износа будем рассматривать раздельно, акцентируя внимание на абразивно-усталостном механизме износа резиновых футеровок рудоразмельных мельниц.

При этом следует отметить одно весьма важное эмпирическое наблюдение: механизмы износа футеровки и крупногабаритных шин (КГШ), особенно в условиях эксплуатации их на рудных карьерах, несмотря на некоторые различия, имеют много общего, а именно:

- механизмы разрушения: в КГШ превалирует абразивно-усталостный износ; в резиновой футеровке мельниц также абразивно-усталостный или точнее усталостно-гидродуарноабразивный;
- температура нагрева: в области контакта с контртелом (в КГШ с профилем дороги) на поверхности и в массиве резины развивается нестационарное тепловое поле, оказывающее отрицательное влияние на долговечность;
- старение резины: срок службы КГШ и РФ исчисляется месяцами, а иногда годами; за это время благодаря процессам структурирования и деструкции физико-механические характеристики резины существенно изменяются: модуль сдвига может увеличиться в 1,4-1,6 раза, а коэффициент диссипации уменьшиться в 2-4 раза [53].

Поэтому обзор работ по трению и износу резин будет выполнен также с учетом этих особенностей эксплуатации РФ и КГШ. При этом следует отметить, что по износу крупногабаритных шин имеется довольно обширная литература [17, 19]. Автор умышленно сузил рамки обзора, справедливо полагая, что физико-химическая сторона этой важной проблемы рассмотрена в специальной литературе, часть из которой цитируется ниже [1-72].

Природа внешнего трения резины. Следует различать сухое трение (прокладки, уплотнения, бандажи фрикционных колес) и трение со смазкой (в ос-

новном, уплотнительные манжеты). В настоящее время существует несколько теорий внешнего трения резины; наиболее разработанной является молекулярно-кинетическая теория трения, основы которой были заложены Шалламахом и Г.М. Бартеневым [9, 55-57]. Согласно этой теории сила трения F равна

$$F = F_1 + F_2;$$

$$F_1 = \mu_{\text{мех}} \cdot N; \quad F_2 = \mu_{\text{мол}} (N + N_0),$$

где F_1 – сила трения, связанная непосредственно с механическим зацеплением неровностей трущихся поверхностей;

F_2 – сила трения, связанная с молекулярным взаимодействием трущихся поверхностей;

$\mu_{\text{мех}}$ и $\mu_{\text{мол}}$ – коэффициенты трения, связанные соответственно с механическим зацеплением и с молекулярным взаимодействием трущихся поверхностей;

N – нормальная нагрузка между трущимися телами;

N_0 – сила молекулярного взаимодействия в поверхностях контакта.

В 1953 году Шалламах [55] предложил следующую формулу для расчета силы трения F в зависимости от скорости скольжения V и температуры T

$$F = \frac{1}{\gamma} \left(U_0 + kT \ln \frac{V}{B} \right);$$

позже Г.М. Бартенев [9] уточнил эту формулу для гладких поверхностей контакта трущихся поверхностей

$$F = \frac{2N_{\kappa}}{\lambda} \left(U_0 + kT \ln \frac{V}{V_0} \right).$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:

γ – постоянная, зависящая от свойств резины;

U_0 – энергия активации процесса разрушения;

k – постоянная Больцмана;

N_{κ} – среднее статистическое число цепей резины, находящихся в контакте с контртелом;

$V_0 \cong 1000$ м/с – скорость звука в застеклованной резине;

λ – постоянная резины ($\lambda \cong 5 \cdot 10^{-7}$ с).

Как видно, несмотря на усилия многих ученых молекулярно-кинетическая теория внешнего трения резины носит в основном феноменологический характер; при этом экспериментальные данные и определяют эмпирические уравнения, связывающие в единое целое информационные параметры. Что же касается трения резины со смазкой (а к такому весьма осторожно можно отнести и РФ мельниц), то в существующей литературе серьезных теоретических исследований нет [9, 17, 19, 24, 25].

Природа истирания резины. Из многочисленных работ в этой области (обзоры в [8, 16, 27, 28, 51, 59]) следует, что износ является более сложным процессом, чем внешнее трение, и представляет собой результат взаимно-

функционального воздействия механических и физико-химических процессов, протекающих в основном в поверхностном слое контактирующих тел. Исследователи [1, 2, 59] различают пять видов истирания резин: абразивное, усталостное, износ посредством «скатывания», термическое и коррозионное.

1. Абразивный износ. При вдавливании в резину острого выступа контртела впереди него возникает эффект сжатия материала, а позади – большие деформации растяжения. Все это приводит к тому, что позади выступа контртела возникают раздиры резины и на ее поверхности образуются полосы, которые по направлению совпадают с направлением скольжения. Износостойкость резины при абразивном износе определяется преимущественно прочностью материала. Следует подчеркнуть, что аналитический расчет износостойкости резины при абразивном износе с учетом внешних факторов практически отсутствует ввиду его сложности. Элементарный акт абразивного износа рассматривался Шалламахом [56, 57] и другими авторами.

2. Усталостный износ. Это наиболее распространенный вид износа для резиновых футеровок. Теория его наиболее полно разработана И.В. Крагельским и М.М. Резниковским [27]. Согласно их теории при элементарном акте усталостного износа резины происходит разрушение поверхностного слоя материала в результате многократно повторяющихся деформаций от действия контртела. Для характеристики износа известны уравнения И.В. Крагельского

$$I = A \left(\frac{\mu E}{\sigma_0} \right)^\beta \left(\frac{p}{E} \right)^{1+\delta\beta}$$

и М.М. Резниковского

$$I = A \left(\frac{z}{r} \right)^{2\beta-5} \frac{E^{2/3(\beta-1)}}{\sigma_0^\beta} P^{1/3(\beta+2)},$$

где I – интенсивность истирания;

E – модуль упругости резины;

p – нормальное давление;

β – коэффициент усталостной выносливости;

σ_0 – сопротивление раздиру;

δ, z, r – параметры, характеризующие геометрию истирающей поверхности.

Для определения числа циклов n , при котором происходит разрушение резины, М.М. Резниковский [27, 59] предложил уравнение вида

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^\beta,$$

где σ_0 – сопротивление разрыву при однократном нагружении;

σ – амплитуда динамического напряжения;

β – коэффициент стойкости резины к повторным нагружениям.

Как видно из приведенных полуэмпирических уравнений, усталостный износ увеличивается с ростом давления и модуля упругости, с ухудшением усталостных свойств резины и уменьшением сопротивления раздиру.

3. Износ вследствие скатывания. Характерен для высокоэластичных материалов, возникает в результате увеличения силы трения, температуры и скорости скольжения. Разрушение поверхности резины начинается с возникновения трещин, их рост приводит к образованию «скатки» и, в конечном итоге, к отделению частиц от массива. Процесс практически не изучен, в известной литературе отсутствуют какие-либо аналитические зависимости.

4. Коррозионный износ. В пределах эксплуатации барабанных мельниц этот износ в чистом виде практически не встречается; резина достаточно хорошо сопротивляется активной внешней среде. Однако на процесс разрушения футеровки внешняя среда всегда действует неблагоприятно.

5. Температурный износ. В области контакта загрузки и резиновой футеровки всегда возникает температурное поле. По мнению автора работ [1] температура в зоне контакта может превышать 70°C; в редких случаях доходить до 100°C и больше.

Из многочисленных публикаций, часть которых цитируется в настоящей работе, применительно к износу резиновой футеровки мельниц, можно сделать следующие обобщения:

1. Износ резины определяется совокупностью целого ряда факторов: параметров нагружения, свойств абразивной (или гидроабразивной) среды, активностью внешней среды, температурой, коэффициентом трения, степенью поврежденности материала, физико-механическими характеристиками резины и т.д. (Бартенев Г.М., Резниковский М.М., Крагельский И.В., Ратнер С.Б., Евстратов В.Ф., Пенкин Н.С., Копченков В.Г., Непомнящий Е.Ф., Чижик Е.Ф., Палмгрен, Шалламах, Мур, Нильсон, Грош, Утияма и другие).

2. На интенсивность изнашивания материала влияют: давление контртела, скорость движения, температура, агрессивная среда и ряд других факторов; при этом, что весьма важно, соблюдается принцип температурно-временной суперпозиции, т.е. адекватность влияния температуры и скорости.

3. В реальных условиях эксплуатации всегда наблюдается сложный характер износа, объединяющий все упомянутые механизмы; в конкретных случаях один из видов может преобладать или со временем переходить в другой.

4. Абразивный износ и износ вследствие скатывания относятся к «катастрофическим» случаям, и в практике их стараются не допускать.

Наиболее распространенным видом износа для футеровок барабанных мельниц является абразивно-усталостный износ. Именно этот механизм износа в дальнейшем будет рассматриваться более подробно.

Прогнозирование износостойкости резины. Обзор работ в этой области наиболее полно представлен в работах Чижика Е.Ф. [1]. Представим результаты исследований в виде кратких обобщений:

1. Эрозионный износ. На первых этапах исследования эрозионного износа (модели Финни, Виттера, Непомнящего Е.Ф. [1] и других авторов) в основе ме-

ханизма разрушения материала лежало представление об усталостной природе поверхностного слоя. Полученные при этом эмпирические формулы качественно согласовывались с конкретным экспериментом, однако мало проясняли физическую сущность проблемы и практически не имели прикладного значения. Использование для этой цели удельной поверхностной энергии также не дало ощутимых результатов [1].

2. Усталостное разрушение резины вследствие локального термического пиролиза. В основе такого разрушения лежит хорошо известный факт об экзотермических эффектах в устьях усталостных трещин материала [1, 10]: локально температура в движущейся трещине может достигать нескольких сот градусов. Такие локальные повреждения резины вследствие деструкции могут стать очагами эрозионного или усталостного разрушения. Дальнейшего развития эта, в общем-то, перспективная теория не получила. Однако результаты исследований были положены в синергетическую модель разрушения футеровок мельниц [1, 2].

3. Износостойкость футеровок и масштабный эффект. С увеличением диаметра барабана мельниц растёт интенсивность ударного воздействия загрузки на резиновую футеровку. По мнению Чижика Е.Ф. [1] при сравнении мельниц различного диаметра d_1 и d_2 долговечности t_1 и t_2 их футеровок относятся между собой обратно пропорционально линейным размерам мельниц, т.е. $\frac{t_1}{t_2} \equiv \frac{d_1}{d_2}$. Автор получил хорошее совпадение с результатами эксплуатации футеровок «Треллеборг».

4. Оценка износостойкости резиновых и стальных футеровок при ударных нагрузках. На основе теории Герца о соударении твердых тел автор работы [1] для сравнения износостойкости двух разных материалов (рассматривались сталь 110Г13Л и футеровочная резина) вывел соотношение критических скоростей футеровки и контртела. Было показано, что резиновая футеровка лучше сопротивляется абразивному износу, чем сталь. Для частных случаев (ударные нагрузки) такая модель дает возможность выбора подходящего материала и сравнение его износостойкости с уже известным материалом.

5. Оценка долговечности резиновой футеровки на основе термофлуктуационной теории прочности. Используя термофлуктуационную теорию прочности и уравнение С.Н. Журкова, Рабинович [1] вывел соотношение между удельной поверхностной энергией γ материала, пределом его прочности σ и средним размером образующихся в результате износа адгезионных частиц α_{\min}

$$\alpha_{\min} = 24000 \frac{\gamma}{\sigma}.$$

По мнению автора, размер этих частиц является параметром материала.

Используя это соотношение, Е.Ф. Чижик для конкретных условий получил выражение типа

$$\alpha_{\min} = 2,6 \cdot 10^{-5} \frac{E}{\sigma} \sqrt{\frac{\mu}{\rho}},$$

где μ – молекулярный вес резины;

ρ – плотность резины.

Используя это уравнение, автор для полиуретанового лифтера мельницы диаметром 9 м получил следующие данные: $\alpha_{\min} = 0,44$ мм, $T = 70^\circ\text{C}$, время для образования отдельного слоя изношенных частиц футеровки (толщина слоя равна α_{\min} , т.е. 0,44 мм) $\tau = 10^5$ сек; расчетная долговечность лифтера составляет 1700 ч, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В дальнейших работах для расчета долговечности резиновой футеровки автор использовал уравнение Журкова – Бартенева с введением функции поврежденности резины

$$\tau = \tau_0 \xi_m \eta_\phi K_n \left(\ln \frac{\Delta P_\infty}{\Delta P_\infty - \Delta P_{кр}} \right) \exp \left[\frac{U_0 - \gamma(\sigma, T) \sigma}{kT} \right].$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$k = 8,32 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К) – постоянная;

$\tau_0 = 10^{-13}$ с⁻¹ – постоянная;

$\ln \frac{\Delta P_\infty}{\Delta P_\infty - \Delta P_{кр}}$ – функция поврежденности резины в локальном объеме мате-

риала;

T – температура;

γ – постоянная, характеризующая влияние на процесс разрушения полей напряжений и температур;

ξ_m – постоянная, характеризующая конструктивные и технологические характеристики мельницы;

η_ϕ – коэффициент, характеризующий профиль и конструктивные особенности футеровки;

K_n – коэффициент влияния несимметрии загрузки мельницы, для зоны умеренного износа $K_n = 1,0$.

Приведенное уравнение обладает рядом достоинств, среди которых можно назвать следующие: использование микро- и макрохарактеристик резины; использование экспериментальных данных, полученных в условиях производства по определению температуры нагрева РФ и нормальных напряжений в резине.

6. Исследования гидроабразивного износа резиновых футеровок. Такие исследования авторы работ [1, 28, 30-36] проводили для единичного акта при смешанном механизме износа: абразивная частица шарообразной формы вдавливалась в поверхность футеровки и при ее дальнейшем скольжении (угол атаки 35-45°) разрушала микрообъем резины. В этом случае, по мнению Е.Ф. Чижика [1], справедливо следующее соотношение

$$W_0 = 3,4 \cdot 10^{-4} k \gamma^{\frac{5}{3}} V_0^{\frac{10}{3}} D^3 \sin^{\frac{5}{3}} \alpha \operatorname{ctg} \alpha \cdot C_n,$$

где W_0 – величина объемного гидроабразивного износа от единичной абразивной частицы;

k, C_n – постоянные;

γ – плотность абразивной частицы;

V_0 – скорость движения абразивной частицы;

D – диаметр частицы;

α – угол атаки.

Как видно, величина объемного гидроабразивного износа зависит от скорости движения единичного контртела, его размера и удельного веса; физико-механические характеристики резины при этом учитываются исключительно некоторой постоянной k , что ограничивает применение рассматриваемого соотношения и не позволяет использовать его для прогнозирования долговечности РФ.

Гидроабразивный износ резин исследовали также авторы работ [28, 30-36]. Для интенсивности износа I_w резины при контактно-динамическом нагружении (поток абразивных частиц) Пенкин Н.С. [28] предложил уравнение вида

$$I_w = i_w \cdot W_n,$$

где i_w – удельный энергетический износ резины;

W_n – плотность поглощенной энергии при ударе абразивных частиц о поверхность футеровки.

Копченков В.Г. [30] несколько уточнил это выражение

$$I_w = \Pi \frac{W}{W_\delta},$$

где Π – параметр поврежденности поверхностного слоя футеровки при ударе;

W – плотность подводимой энергии;

W_δ – плотность энергии, характеризующая разупрочнение материала в поверхностном слое футеровки.

Авторы использовали эти выражения для расчета интенсивности износа резиновых футеровок спиральных классификаторов, насосов, флотомашин, сит грохотов и т.д. При этом Копченков В.Г. [30] экспериментально показал, что при контактно-динамическом нагружении в результате многочисленных ударов на поверхности футеровки образуются усталостные трещины, направление которых совпадает с направлением угла атаки абразивных частиц.

Добровольский А.Г. [1] для интенсивности износа резин в зависимости от угла атаки при ударе частиц без скольжения предложил следующее эмпирическое уравнение

$$I_w = U_w \frac{\tau R_1^2 \rho_1^{0,6} E_o^{0,4} V^{2,2} N \left(1 - \mathcal{E} \sin^2 \alpha - \frac{5}{7} \cos^2 \alpha \right)}{(1 - \mu^2)^{0,4} \sin^{0,8} \alpha},$$

где U_w – удельный энергетический износ резины;

R_1 – радиус частицы;

ρ_1 – массовая плотность частицы;

E_o – динамический модуль упругости резины;

V – скорость частиц до удара;

N – число частиц в единице объема;

\mathcal{E} – эластичность резины по откоосу;

α – угол атаки частиц;

μ – коэффициент Пуассона резины.

7. Разрушение резин при многократном вдавливании сферических тел.

Чижик Е.Ф. [1] при исследовании многократного вдавливания металлических шаров различного диаметра в резиновые пластины на глубину 70-80 % от их толщины показал, что резина не разрушается при условии соблюдения следующего соотношения

$$Z \leq \frac{P}{C},$$

где Z – глубина вдавливания;

P – нагрузка;

C – жесткость резиновой пластины.

Таким образом, по известной жесткости плиты футеровки и известному предельно допустимому напряжению сжатия, не превышающего удельное давление в центре сферического углубления при контакте шара и плиты, можно определить некоторую минимальную толщину плиты резиновой футеровки.

Выводы по обзору. 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 углубленно 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 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: абра-

живного износа, удара, вдавливания контртел в поверхность резины, усталости, старения, влияния температуры и т.д. Все эти механизмы в своем взаимно-функциональном взаимодействии и порождают обобщенный механизм разрушения от износа резины, как в объеме, 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 [2] такой интегральной величиной может служить энергия разрушения от абразивно-усталостного механизма износа. Такой прием в последние годы получил довольно широкое распространение, как для резин [3], так и для других материалов.

Ранее [2] с учетом энергетического критерия рассматривалась синергетическая модель разрушения РФ и обобщенный критерий расчета ее долговечности. Было получено уравнение для определения долговечности t^* локального объема в виде

$$\Delta U_p^* = \Delta U_y^* + \Delta U_{из}^* = \int_0^{t^*} (\sigma_0 \dot{\epsilon}_0 - \dot{q} + \dot{\xi} + \dot{\chi}) dt,$$

где ΔU_p^* – энергия разрушения резины;

ΔU_y^* – энергия разрушения от усталостного механизма;

$\Delta U_{из}^*$ – энергия разрушения от абразивного износа;

\dot{q} – тепловой поток;

$\dot{\xi}$ – энергия разрушения от абразивного износа;

$\dot{\chi}$ – энергия от действия внешней активной среды.

Первая составляющая этого уравнения ΔU_y^* подробно описана в [3]; вторая составляющая $\Delta U_{из}^*$ представляет собой часть энергии, идущей на разрушение поверхностного слоя резины от абразивного износа; в известной литературе данные о величине такой энергии отсутствуют.

Формулировка цели исследований. Целью настоящей работы является: построение физической модели абразивного износа РФ; построение алгоритма

определения энергии разрушения от абразивного износа; определение энергии разрушения $\Delta U_{из}^*$ при прямых экспериментальных исследованиях.

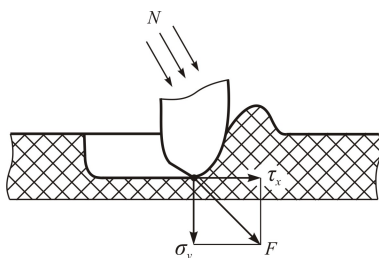
Изложение основного материала.

Феноменологическая модель абразивного износа резиновой футеровки. При взаимодействии технологической загрузки с резиновой футеровкой острые и твердые контртела (шары и частицы перерабатываемого материала) вдавливаются в резину под определенным углом (рис.1) и некоторое время находятся в контакте с ее 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, которые 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 объемов 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 объеме резины возникает сложное напряженное состояние, которое в простейшем случае следуя модели Герца – Динника можно свести к нормальным напряжениям σ_y и касательным τ_x (рис. 1).

Интенсивность абразивного износа определяется величиной нагрузки, твердостью 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 намного большую степень поврежденности, чем в объеме [60-62].

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 [50]. 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 расчета и критерии разрушения.

Определение энергии разрушения при абразивном износе резин. Как уже отмечалось [1, 2], разрушение резиновых футеровок барабанных мельниц происхо-



N – усилие среды; σ_y – нормальное напряжение; τ_x – касательное напряжение; F – обобщенная сила

Рис. 1 – Характер взаимодействия абразивной частицы с поверхностным слоем резиновой футеровки

дит по абразивно-усталостному механизму. Рассмотрим абразивную составляющую этого довольно сложного многопараметрического процесса. Известно [2, 64], 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» (термин, используемый Шалламахом [56, 57], Грошем [65], Хетфилдом, Ратманом [64] и другими [66, 67]) резины, находящихся в контакте с контртелом. Ниже будет использоваться термин «агрегат резины», более подходящий для процесса макроразрушения при абразивном износе резиновой футеровки.

Здесь следует отметить, что термин «агрегат резины» с определенными допущениями соответствует терминам «локальный объем» или «характерный объем», широко используемый в механике разрушения резин [3]. Это такие объемы материала, такие первичные элементы, которые обусловлены природой и структурой материала; они должны удовлетворять двум правилам – с одной стороны быть настолько малыми, чтобы каждый элемент считался точкой сплошной среды; с другой – настолько большими, чтобы обладать свойствами этой среды. Эти термины также хорошо согласуются с дилатонной моделью прочности, используемой в механике разрушения конструкционных материалов [54]. 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 еще один важный аспект этой модели: она с позиций фундаментальной теории прочности подтверждает прочностную природу износоустойчивости конструкционных материалов, в рассматриваемом случае резин, что вполне оправдывает применение в настоящей работе энергетической концепции абразивного износа.

Примем следующие важные допущения, которые не искажают общие представления о механизме разрушения резины вследствие абразивного износа и не выходят за рамки принятой феноменологической модели:

- будем считать, что между матрицей и контртелом (т.е. между резиновой футеровкой и нагрузкой) существует однородное относительное скольжение со скоростью V ;
- температура в зоне контакта не превышает допускаемую температуру ($T < [T]$) для рассматриваемого типа резины;
- для исследуемого процесса характерна совместимость с принципом эквивалентности скорости и температуры, т.е. величина $A(V, T)$, зависящая от скорости и температуры, подчиняется принципу температурно-временной суперпо-

зиции (так называемое уравнение ВЛФ – Вильямса–Ландела–Ферри); для деформационных характеристик резин этот принцип изложен в работе [3], для характеристик при износе – в работах [57, 67];

- будем считать, что отрыв агрегата резины от матрицы, т.е. разрыв связи, происходит в то время, когда энергия, накопленная агрегатом во время процесса износа, достигнет некоторого критического значения U_0 ; Шалламах [56, 57], Грош [65, 67], позже Хетфилд [64] при исследовании единичных актов износа (царапание иглой) наполненных резин показали (в том числе подтвердили экспериментально), что энергия, поглощенная «молекулярным агрегатом» во время износа, по порядку совпадает с энергетическим барьером, существующим между свободным и связанным состояниями агрегата; такая концепция разрушения при абразивном износе довольно обстоятельно обоснована в работах [57, 67] при исследовании микропроцессов износа резины и в работах [28, 30, 51, 63, 68] при изучении макропроцессов износа резиновых покрытий;
- будем считать, что для исследуемой резины функция релаксации агрегатов известна и определяется свойствами материала. При этом, зная релаксационную функцию и закон смещения двух находящихся в контакте материалов (однородное относительное скольжение с заданной скоростью), на основании интеграла Больцмана [69–71] можно получить уравнение силы связи для элементарного агрегата, что позволит вычислить силу трения (износа) как среднее значение сил связи.

При известном динамическом пределе одной связи (эту величину можно найти экспериментально, исходя из величины трения при скоростях, близких к скорости при нулевом скольжении), полученной силе износа и согласно энергетическому критерию разрушения можно определить критическую энергию разрушения резины при абразивном износе.

Кинетическое уравнение Больцмана. Представляет собой уравнение баланса частиц в элементе фазового объема $dv \cdot dr$ ($dv = dv_x \cdot dv_y \cdot dv_z$, $dr = dx dy dz$) и выражает факт, что изменение функции распределения частиц $f(v, r, t)$ со временем происходит вследствие движения их под действием внешнего поля сил и вследствие столкновения между частицами. Это интегро-дифференциальное уравнение, которому удовлетворяют неравновесные одночастотные функции распределения системы из большого числа частиц (например, функции распределения молекул газа $f(v, r, t)$ по скоростям v и координатам r , функции распределения электронов в металле, фотонов, фононов и т.д.).

Кинетическое уравнение Больцмана – основное уравнение микроскопической теории необратимых процессов – позволяет вычислить кинетические коэффициенты и получать макроскопические уравнения для различных процессов переноса (вязкости, диффузии, теплопроводности).

Для газа, состоящего из частиц одного сорта, кинетическое уравнение Больцмана имеет вид [18]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \left(v \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{m} \left(F \frac{\partial f}{\partial v} \right) = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{cm}, \quad (1)$$

где $f(v, r, t)$ – одночастотная функция распределения, нормированная так, что $f(v, r, t)dvdr$ дает среднее значение числа частиц в элементе фазового объема $dv-dr$ около точки $(v; r)$;

$F = F(r, t)$ – сила, действующая на частицу (может зависеть от скорости);

$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{cm}$ – изменение функции распределения вследствие столкновений (интеграл столкновений).

Второй и третий члены уравнения (1) представляют изменение функции распределения при движении частиц без столкновений.

Решение кинетических уравнений является математически сложной задачей (нелинейные интегро-дифференциальные уравнения), поэтому для их решения используются, как правило, приближенные методы. Для некоторых практических задач оказывается достаточным простое приближение интеграла столкновений:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{cm} = -\frac{f - f_0}{\tau_c}, \quad (2)$$

где f_0 – функция распределения при тепловом равновесии;
 τ_c – время релаксации.

Если внешние воздействия на систему отсутствуют (или внезапно исчезают) при условии, что $\tau_c = const$, то функция распределения $f(t)$ примет значение f_0 за время порядка времени релаксации τ_c [18, 20], так как

$$f(t) - f_0 = (f(0) - f_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right).$$

Величину τ_c можно оценить с помощью оператора столкновений [71].

Этот подход нашел применение при решении поставленной задачи.

Энергетический критерий разрушения резины для абразивного износа.

В случае отрыва агрегата резины от матрицы предполагается, что функция релаксации резины $r(t)$ известна (т.е. известны механические параметры резины) и между загрузкой и футеровкой существует однородное относительное движение, в большинстве случаев с постоянной и ограниченной малыми величинами скоростью V , 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

$$\frac{n_0}{t_0} = \frac{n_1}{t_1} = \frac{n}{t_0 + t_1}. \quad (3)$$

Предположение, что время, в течение которого агрегат находится в свободном состоянии, пропорционально времени релаксации τ агрегата,

$$t_1 = a\tau,$$

где a – некоторая постоянная, будет справедливо, если принять, что время, необходимое для достижения агрегатом известного динамического уровня, пропорционально τ , а смещение при этом будет пропорционально скорости V .

С учетом приведенных предположений, силу связи $f(t)$ агрегатов определим, пользуясь интегралом Больцмана [69]

$$f(t) = V \int_0^t r(t-t') dt'. \quad (4)$$

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

$$f_0 = \frac{2F(0)}{n_0}, \quad (5)$$

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

Предполагая, что связь между агрегатами резины исчезает, когда сила достигает величины f_0 , уравнение (4) можно записать в виде

$$f(t_0) = f_0. \quad (6)$$

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

$$F = \frac{n_0}{t_0} \int_0^{t_0} f(t) dt. \quad (7)$$

Положим [2, 64], что резина характеризуется функцией релаксации вида

$$r(t) = E_0 (1 - be^{-t/\tau}), \quad (8)$$

где E_0 – модуль упругости резины;

τ – время релаксации;

b – некоторая постоянная;

t – текущее время.

Элементарную силу связи каждого агрегата определяют в соответствии с (3) при заданном виде релаксационной функции (8) из выражения

$$f(t) = vtE_0 + \tau vbE_0 - vbE_0 \tau e^{-t/\tau}. \quad (9)$$

Вводя обозначения

$$L = v \cdot \tau \text{ и } \alpha = \frac{t}{\tau}, \quad (10)$$

где L – длина релаксации агрегата молекул материала;

τ – время релаксации.

Зависимость (9) будет иметь вид

$$f(t) = LE_0 \left[\alpha + b(1 - e^{-\alpha}) \right]. \quad (11)$$

Величины τ и L (по порядку значений) совпадают: длина релаксации L – со средней длиной свободного пробега агрегатов резины, а время релаксации τ – со средним временем их свободного пробега [55-57].

С учетом принятых обозначений (10), из условий (6) получаем

$$f_0 = f(t - t_0) = E_0 L \left[\alpha_0 + b(1 - e^{-\alpha_0}) \right], \quad (12)$$

и, пользуясь уравнением высшего порядка

$$L = \frac{f_0}{E_0} \left[\alpha_0 + b(1 - e^{-\alpha_0}) \right]^{-1}, \quad (13)$$

можно определить t_0 (а также α_0).

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

$$F = \frac{n_0}{t_0} \int_0^{t_0} f(t) dt. \quad (14)$$

После интегрирования уравнение общего трения (14) будет иметь вид

$$F = \frac{n_0 E_0 L}{\alpha_0} \left[\frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1) \right], \quad (15)$$

или с учетом (3)

$$F = \frac{n E_0 L}{\alpha_0 + a} \left[\frac{\alpha_0^2}{2} + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1) \right]. \quad (16)$$

При исследовании изменения адгезионной составляющей трения в зависимости от скорости скольжения $F(L)$, достаточно исключить α_0 совместным решением уравнений (13) и (16) и исследовать получаемые таким образом результаты.

С учетом изложенного можно утверждать следующее: энергетический 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

$$U_0 = V \int_0^{t_0} f(t) dt, \quad (17)$$

или с учетом (7), (10)

$$U_0 = V t_0 F / n_0. \quad (18)$$

Согласно принятой пропорциональности (3)

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

зависимость (18) преобразуется к виду:

$$U_0 = \frac{L(\alpha_0 + a)}{n} F, \quad (19)$$

или через силу трения

$$F = \frac{nU_0}{L(\alpha_0 + a)}. \quad (20)$$

Для резины, функция релаксации которой имеет вид (8), с учетом вычисленного интеграла (16), выражение для параметра L по зависимостям (19) или (20) будет

$$L = \sqrt{\frac{U_0/E_0}{(\alpha_0^2/2) + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1)}}. \quad (21)$$

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

$$\begin{cases} L = \sqrt{\frac{U_0/E_0}{(\alpha_0^2/2) + b(\alpha_0 + e^{-\alpha_0} - 1)}}; \\ F = \frac{nU_0}{L(\alpha_0 + a)}. \end{cases} \quad (22)$$

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 (18) при известной релаксационной кривой и экспериментально найденных параметрах износа модельных образцов.

Экспериментальные исследования. Такие исследования наиболее целесообразно проводить согласно ГОСТ 426-77 (Метод определения сопротивления истиранию при скольжении [72]). Использовался экспериментальный стенд МИ-2 и стандартные образцы из футеровочной резины 541933-1 размером 20×20×8 мм; образцы присоединялись к специальной рамке-держателю и истирались на шлифовальной шкурке (по ГОСТ 344-74). Для статистической обработки данных проводилось не менее девяти испытаний. Полученные таким образом результаты были следующие:

1. Сила трения $F = 16$ Н.
2. Время истирания $t = 150$ сек.
3. Скорость истирания $V = 0,285$ м/сек.
4. Количество частиц износа $n_0 = 60 \cdot 10^3$ (усредненное значение по результатам девяти испытаний; усредненная масса частиц – 0,5 г; при усредненном диаметре частиц $d = 0,4$ мм количество частиц в одном кубическом метре $n = 22 \cdot 10^9$ 1/м³).

5. В этом случае энергия разрушения для одного фрагмента резины (т.е. энергия отделения его от матрицы) согласно уравнению (18) будет

$$U_0 = \frac{F \cdot V \cdot t}{n} = \frac{16 \cdot 0,285 \cdot 150}{6,0 \cdot 10^3} = 114 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

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

$$\Delta U_{из} = U_0 \cdot n = 114 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \cdot 10^9 = 0,25 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3.$$

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 [58], а количество и линейный размер – подбором шлифовальной шкурки по ГОСТ 344-74. В процессе подбора параметров износа добились 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.

Поскольку автор не ставил своей задачей исследование статистического распределения агрегатов резины по крупности, в дальнейших расчетах для резины 541933-1 принималась усредненная 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 $(0,22 \div 0,28) \cdot 10^{10}$ Дж/м³, что вполне объяснимо, учитывая стохастический характер износа и технологические факторы. Влияет на величину энергии разрушения также и температура внешней среды.

На рис. 2 показана такая зависимость для исследуемой резины 541933-1. Данные получены для мо-

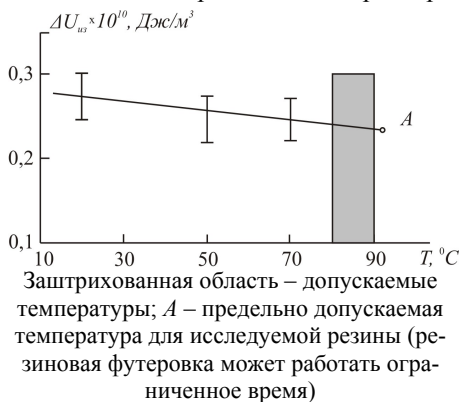


Рис. 2 – Температурная зависимость плотности энергии разрушения при абразивном износе для образцов из резин 541933-1

дельных образцов; температура замерялась хромель-копелевыми термопарами. Как видно, в диапазоне температур 20-90°C плотность энергии разрушения с определенными допущениями можно принимать независимой от температуры внешней среды.

Таким образом, можно считать, что для резины 541933-1 получена плотность энергии разрушения, и при температурах $T \leq [T]$ ее можно считать постоянной материала; для дальнейших расчетов долговечности реальных конструкций резиновых футеровок при абразивно-усталостном механизме износа будет принята следующая величина энергии разрушения $\Delta U_{из} = 0,25 \cdot 10^{10}$ Дж/м³.

Выводы.

1. Построена физическая модель абразивного износа резиновой футеровки барабанной мельницы.

2. Построен алгоритм определения энергии разрушения резины от абразивного износа.

3. Экспериментально определена энергия разрушения резины от абразивного износа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижик Е.Ф. Барабанные рудоизмельчительные мельницы с резиновой футеровкой.– Днепропетровск.– 2005.– 361 с.
2. Чижик Е.Ф., Маркелов А.Е., Дырда В.И. Защитные футеровки барабанных рудоизмельчительных мельниц.–Днепропетровск: «Авантаж», 2002.– 240 с.
3. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях.– Киев: Наук, думка, 1988. – 239 с.
4. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров.– Л.: Химия, 1990.– 423 с.
5. Чижик Е.Ф., Дырда В.И. Феноменологическая модель разрушение резины при абразивно-усталостном износе // Геотехническая механика. – 1999. – № 11. – С. 226-257.
6. Чижик Е.Ф. Износостойкость защитных футеровок рудораз-мольных мельниц // Труды II Международного симпозиума по механике эластомеров, Днепропетровск, 23-26 июня 1997. – Днепропетровск: Полиграфист, 1998. – Т. 2. – С. 292-316.
7. Чижик Е.Ф. Исследование и разработка конструкции резиновой футеровки для рудоразмольных мельниц: Автореф. дис. канд. техн. наук 05.05.06.– Днепропетровск, 1977.– 24 с.
8. Стеллер Е.Е., Ратнер С.Б. Закономерности ударного трения и изнашивания полимерных материалов // Труды ВНИИПТУглемаш.– М., 1979. – Вып. 31. – С. 34-66.
9. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. – Л.: Химия, 1972. – 250 с.
10. Дырда В.И. Исследование локальных экзотермических эффектов при разрушении резины // Проблемы прочности.– 1982.– № 7.– С. 102-104.
11. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 270 с.
12. Кашеев В.Н., Вольф Э.Л. // Трение и износ.– 1982.– Т. 2, № 4.– С. 655-660.
13. Крагельский И.В. и др. Основы расчетов на трение и износ.– М.: Машиностроение, 1977.– 570 с.
14. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Б. Кинетическая теория прочности твердых тел.– М.: Наука, 1974.– 560 с.
15. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968.– С. 480.
16. Тейбор Д. Износ. Краткий исторический обзор // Проблемы трения и смазки. – 1977, № 4.– С. 6-16.
17. Мур Д.Ф. Трение и износ резин и шин // Тр. Международной конференции по каучуку и резине, г. Киев, 1979 г. – Киев, 1979. – Том В.
18. Нильсон Г., Торд Андрен. Использование резины для защиты от износа в горнодобывающей промышленности / Тр. Международной конференции по каучуку и резине, г. Киев, 1979 г. – Том В. – Киев, 1979.

19. Мур Д.Ф. Трение и смазка эластомеров.– М.: Химия, 1977.– 264 с.
20. Айнбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. Введение в теорию трения полимеров.– Рига: Зинатне, 1978.– 220 с.
21. Гаркунов Д.Н., Поляков А.А., Семенов В.Я. Современные проблемы триботехники. // Трение и износ.– 1980, № 3.– С. 391-402.
22. Конвисаров Д.В. Трение и износ металлов.–М.: Машгиз.– 1947.– 182 с.
23. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации.– М.: Машиностроение, 1971.– 240 с.
24. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петраковец и др.– Минск: Наука и техника, 1976.– 430 с.
25. Утияма Е. Процесс истирания полимерных материалов. – Дзюнкацу, 1973. – Т. 18, № 4. – С. 294-304.
26. Свириденко А.И., Савкин В.Г. Структурная трибомеханика материалов на основе полимеров // Трение и износ.– 1980. – № 1.– С. 150-167.
27. Крагельский И.В. О природе трения полимеров / Механика полимеров, 5, 1972.– С. 797-808.
28. Пенкин Н.С. Износостойкость гуммированных деталей машин в абразивных средах: Автореф. дис. доктора техн. наук: 05.02.04. – М., 1978.– 47 с.
29. Голошапов Н.Н. Термокинетика газоабразивного износа высокоэластичных материалов и разработка износостойкого гуммированного пневмотранспортного оборудования: Автореф. дис. канд. техн. наук 05.02.04.– Ростов-на-Дону, 1989.– 19 с.
30. Копченков В.Г. Энергетический подход к оценке износостойкости резины.– Ставрополь: Изд. СевКавГТУ, 2003.– 198 с.
31. Копченков В.Г. Модели изнашивания резины для прямого удара потоком частиц // Каучук и резина.– 2003. – № 4.– С. 25-28.
32. Копченков В.Г. Механизм разрушения высокоэластичного полупространства цилиндрическим индентором при многоцикловом нагружении // Сер. Естественнонаучная: Сб. науч. тр. СтГТУ. – Ставрополь, 1998. – Вып. 1. – С. 35-43.
33. Копченков В.Г. Микроскольжение при прямом упругом ударе абразивной частицы // Сер. Естественнонаучная: Сб. науч. тр. – Ставрополь, 1999. – Вып. 2. – С. 8-12.
34. Копченков В.Г., Сербин В.М., Пенкин Н.С. Механизм изнашивания эластомерных материалов под воздействием транспортируемых абразивных сред // Сб. докл. Междунар. конгресса «Механика и трибология транспортных систем».– Ростов/Дон.– 2003.– Т. 2.– С. 27-30.
35. Копченков В.Г. Модель фрикционного контакта твердой частицы с эластичной поверхностью при ударе // Механика и физика фрикционного контакта: Межвуз. сб. науч. тр. – Тверь, 2001. – Вып. 8. – С. 100-104.
36. Копченков В.Г., Пенкин Н.С. Влияния фрикционного контакта на траекторию движения твердой частицы при ударе // Трение и износ.– 2001.– Т. 22, № 6.– С. 649-664.
37. Дербас А.Г. Исследование износостойкости и повышение долговечности футеровок измельчительного оборудования. Автореф. дис.– Кривой Рог, 1973.
38. Таненбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин.– М.: Машиностроение, 1966.
39. Дьяков В.Г. Некоторые вопросы теории абразивного износа // Коррозия, материалы, покрытия. Труды Гипронефтемаш. – М.: Недра, 1967. – № 4.
40. Хрущов М.М. Закономерности абразивного изнашивания // Износостойкость.– М.: Наука, 1975.
41. Чижик Е.Ф., Шилов П.М., Холоша В.И. Экспериментальные исследования износостойкости материалов в гидроабразивной среде // Исследование износа с целью выявления путей повышения срока службы и качества выпускаемых машин.– М., 1971.
42. Чижик Е.Ф., Шилов П.М. Повышение износостойкости оборудования горно-обогатительных комбинатов Кривбасса // Горный журнал. Известия вузов. – 1974. – № 10.
43. Чижик Е.Ф., Горбач Б.М. Теоретическое исследование процесса гидроабразивного износа // УкрНИИТИ. Реферативная информация. – Киев: Вища школа, 1971. – Вып. 5.
44. Чижик Е.Ф., Горбач Б.М. Гидроабразивная износостойкость некоторых конструкционных материалов // Технический прогресс на Ново-Криворожском горно-обогатительном комбинате. – Днепропетровск: Промінь, 1970. – С. 112-117.

45. Горбач Б.М., Чижик Е.Ф., Титиевский Е.М. Испытание резины различных рецептур на гидроабразивный износ // Технический прогресс на Ново-Криворожском горно-обогатительном комбинате. – Днепропетровск: Промінь, 1970. – С. 107-112.
46. Семенов Е.А., Чижик Е.Ф. О теоретической оценке сравнительной износостойкости резиновых и стальных футеровок под ударной нагрузкой // Обогащение полезных ископаемых. – К.: Техника, 1982. – Вып. 31. – С. 103-106.
47. Чижик Е.Ф. Повышение износостойкости футеровки измельчающего и классифицирующего оборудования // Техника и технология обогащения руд. – М.: Недра, 1975. – С. 100-103.
48. Чижик Е.Ф. Повышение износостойкости футеровки измельчающего и классифицирующего оборудования // Техника и технологии обогащения руд. – М.: Недра, 1974.
49. Чижик Е.Ф. Резиновых футеровки барабанных мельниц. – Днепропетровск, 2004. – 259 с.
50. Ферри Д. Вязкоупругие свойства полимеров. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 536 с.
51. Маляров П.В. Исследование режимов работы шаровых мельниц с целью разработки износостойких профилей футеровочных плит: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.06 / Механообр. – Ленинград, 1980. – 24 с.
52. Маляров П.В. Проектирование износостойких профилей футеровочных плит для шаровых мельниц // Известия ВУЗов. Горный Журнал. – 1978. – № 12. – С. 120-123.
53. Дырда В.И., Чижик Е.Ф. Резиновые детали в машиностроении. – Днепропетровск: Полиграфист, 2000. – 584 с.
54. Сорокин Г.М., Григорьев С.П., Голова А.Г. О природе ударно-абразивного изнашивания сталей // Проблемы прочности – 1991. – №4. – С. 73-76.
55. Schallamach A. // Proc. Phys. Soc. – 1953. – V. 66. – 386 с.
56. Schallamach A. A theory of dynamic rubber friction // Wear. – 1963. – 6. – PP. 375-385.
57. Schallamach A. Recent advances in knowledge of rubber friction and tire wear // Rubber Chem. technol. – 1968. – 41. – PP. 200-244.
58. Palmgren Hans. Rubber in the mining industry // Mining magazine. – April 1971. – Vol. 124, №4. – PP. 293-301.
59. Евстратов В.Ф., Бродский Г.И., Сахновский Н.Л. Современное состояние проблемы истирания протекторных резин // Каучук и резина. – 1969. – №11. – С. 17-22.
60. Дырда В.И., Мещанинов С.К. Изменения диэлектрических свойств наполненных амортизационных резин при γ -облучении // Каучук и резина. – 1969. – №11. – С. 40-41.
61. Дырда В.И., Веттегрень В.И., Надутый В.П. О молекулярном механизме износа резин // Каучук и резина. – 1976. – №4. – С. 26-28.
62. Надутый В.П. Исследование и разработка защитных покрытий и упругих подвесок тяжелых горных машин вибрационного типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Днепропетровск, 1979. – 21 с.
63. Копченков В.Г. Трение и изнашивание эластомеров в условиях контактно-динамического нагружения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / ДГТУ. – Ростов-на-Дону, 2004. – 39 с.
64. Hatfield M.R., Rathmann G.B. Application of the absolute rate theory to adhesion // J. Phys.chem. – 1956. – V. 60, №19. – PP. 957-961.
65. Grosch K.A. Viscoelastic properties and the friction of solids. Friction of polymers: Influence of speed and temperature // Nature. – 1963. – 197. – pp. 856-863.
66. Savkoor A.R. On the friction of rubber // Wear. – 1965. – 8. – PP. 222-231.
67. Grosch K.A., Schallamach A. // Rubber chem. Technol. – 1966. – 39. – P. 287.
68. Повышение износостойкости горно-обогатительного оборудования / Под ред. Н.С. Пенкина. – М.: Недра, 1992. – 265 с.
69. Больцман Л. Лекции по теории газов; Пер. с нем. – М., 1956.
70. Чепменс С., Каулинг П. Математическая теория неоднородных газов; Пер. с англ. – М., 1960.
71. Гуревич Л.Э. Основы физической кинематики. – М.; Л., 1940.
72. ГОСТ 426-77. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении.