

УДК 678:539.3

Чижик Е.Ф.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ РЕЗИН ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФУТЕРОВОК РУДОИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МЕЛЬНИЦ

Розглядається механіка руйнування гуми за рахунок процесів тертя та зносу, які можуть виникати у футерівках млинів.

EXAMINATIONS OF FRACTURE OF GUMS FOR MAKING LINING ORECRUSHING MILLS

The mechanics of fracture of gum is considered at the expense of processes of friction and a wear which can arise at lining of mills.

В области трения и износа резин имеется большое количество публикаций, в которых на основе результатов экспериментальных исследований авторы пытались создать некоторые обобщенные феноменологические модели этих, в общем-то, довольно сложных процессов. Различные подходы к изучению трения износа резин, заимствование методологии испытаний из уже хорошо разработанных методов исследований металлов, сложность самих процессов, связанных со спецификой материала и, в первую очередь, с большими обратимыми деформациями и большой диссипацией энергии – все это способствовало появлению результатов, не только отличных по своему качественному характеру, но нередко противоречащих друг другу. Автор не ставил своей целью дать ретроспективный обзор по трению и износу резин, поэтому ниже изложены лишь основные научные концепции, уже получившие широкую известность и экспериментальное подтверждение.

В 1972 году в журнале «Механика полимеров» вышла обзорная статья Крагельского И.В. «О природе трения полимеров» [1], в которой дан обзор работ, начиная с 1941 года. Некоторые проблемы трения и износа резин до 1992 г. обобщены в монографии [2]. После 1992 года количество работ в этой области заметно уменьшилось; в последнее время известны работы Пенкина, Копченкова и других авторов [3, 4-21].

Уже в 1941 г. были получены довольно простые зависимости, связывающие коэффициент трения f со скоростью износа ν , давлением P , твердостью резины H и ее модулем упругости E в виде

$$f = (a + b\nu)e^{-c\nu} + d ;$$

$$a = \frac{1}{a + bp} ;$$

$$f = \frac{1-H}{2} \cdot \frac{P}{E},$$

где a, b, c, d – некоторые постоянные.

Позже появилось довольно большое количество научных работ по исследованию трения и износа резин. Рассмотрим наиболее важные из них.

Крагельский И.В. [22] разработал усталостную теорию изнашивания, согласно которой элементарный акт износа контактируемых поверхностей происходит в результате изменений напряженно-деформированного состояния микрообъемов материала. Автор теории полагает, что в таких микрообъемах происходит накопление микротрещин, их слияние, и этот процесс, в конечном итоге, приводит к образованию частиц износа. По мнению Крагельского И.В., износ – это процесс отделения материала при многократных нарушениях фракционных связей. При этом интенсивность изнашивания определяется отношением объема ΔV разрушенного и удаленного с поверхности трения материала к произведению номинальной площади трения A_a и пути трения L , которым обусловлен износ. В этом случае интенсивность линейного I_h и массового I_δ износа можно записать в виде

$$I_h = \frac{\Delta V}{(A_a L)} = \frac{\Delta h}{L};$$

$$I_\delta = \frac{\Delta Q}{(A_a L)},$$

где Δh – толщина слоя материала, удаленного с поверхности при изнашивании;

ΔQ – масса истертого материала в исходном состоянии.

Энергетическая характеристика износа I_w представляет собой отношение объема удаленного с поверхности трения материала к работе сил трения и выражается в виде

$$I_w = \frac{\Delta V}{(LF)} = \frac{I_h A_a}{F} = \frac{I_h}{\tau_a},$$

где F – сила трения;

τ_a – удельная номинальная сила трения, равная отношению силы трения к номинальной площади трения.

Или

$$I_w = \frac{\xi B \varepsilon^{\nu+1} h_{\max}}{(\nu+1)nl} \eta_c,$$

где ξ – коэффициент, учитывающий влияние на площадь фактического контакта упругих деформаций (при упругом контакте $\xi = 0,5$, при пластическом $\xi = 1$);
 B, ν – параметры степенной аппроксимации кривой;
 $\varepsilon = h/h_{\max}$ – относительное сближение;
 h – глубина внедрения при заданной нагрузке;
 h_{\max} – максимальная высота неровностей профиля;
 $\eta_c = A_c/A_a$ (A_c – контурная площадь контакта, A_a – номинальная площадь контакта);
 n – суммарное число циклов фрикционного взаимодействия, необходимое для элементарного акта износа;
 l – средний диаметр единичного участка контакта в направлении скольжения.

В 1953 году Шалламах [23] одним из первых начал рассматривать внешнее трение резины как термофлуктуационный процесс и предложил математическое выражение, связывающее скорость скольжения V , тангенциальную силу F , равную силе трения, и параметры известного уравнения Аррениуса

$$V = B \exp\left(-\frac{U - \gamma F}{kT}\right),$$

где B – некоторая постоянная;
 U – энергия активации процесса разрушения;
 k – постоянная Больцмана;
 T – температура;
 γ – структурно-чувствительный коэффициент резины.

Отсюда Шалламах получил уравнение для силы трения в зависимости от температуры и скорости скольжения

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

Как видно, в формулу не входит нормальное давление, поэтому она справедлива для больших сил трения и малых давлений.

Дальнейшее развитие идея Шалламаха получила в работах Бартенева [24], предложившего вариант молекулярно-кинетической теории трения. Модель внешнего трения Бартенева учитывает цепное строение молекул резины и «свободное» тепловое движение гибких молекулярных цепей. Для скорости скольжения автор получил следующее выражение

$$V = I \frac{\lambda}{B} \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \left(\frac{F}{\gamma kT}\right),$$

где λ – некоторое среднее расстояние перескока оконечности молекулярной цепи, контактирующей с контртелом;
 I – видоизмененная функция Бесселя 1-го рода.

Эта теория, несмотря на существенные ограничения, получила довольно широкое распространение, и, прежде всего, вследствие своей простоты и наглядности. Однако для нее, как впрочем и для других кинетических теорий, характерны недостатки: она хорошо, в качественном смысле, объясняет процесс трения, но количественная оценка всегда затруднительна. Это связано с тем, что определение параметров, входящих в уравнение скорости скольжения, требует наличия достоверной экспериментальной информации, получаемой в лабораторных условиях. А перенос лабораторных исследований в условия практики дает не всегда адекватные результаты. К тому же модель внешнего трения для простоты и реализуемости обычно не включает в себя некоторые тонкости такого сложного процесса, как взаимодействие резиновой футеровки с потоком крупнокускового абразивного материала, т.е. процесса несомненно стохастического, необратимого с термодинамической точки зрения, и, безусловно, нелинейного.

К таким тонкостям относится также так называемый феномен «третьего тела». При постоянном контакте резиновой футеровки с контртелом вследствие протекающих в поверхностном слое резины механохимических процессов (накопление поврежденности на микроуровне, макропорезы, удаление частиц резины посредством скатывания, старение резины и т.п.) структура этого слоя существенно изменяется, и физико-механические характеристики материала (твердость, модуль сдвига, коэффициент диссипации энергии и т.д.) отличаются от таких же характеристик резинового массива, что, безусловно, нельзя игнорировать в процессе расчетов.

В рассмотренных работах, равно как и в других, исследовался лишь один, редко два, механизма износа резин. Вместе с тем, хорошо известно, что в практике, частично или полностью, всегда присутствуют все перечисленные выше механизмы износа резин, т.е. усталостный, абразивный, температурный, коррозионный износы и износ вследствие скатывания. При этом зачастую один из перечисленных механизмов износа будет доминирующим, а остальные играют второстепенную роль. Поэтому многие авторы, в том числе Бартенев Г.М., Ратнер С.Б., Евстратов В.Ф., Резниковский М.М., Пенкин Н.С., Палмгрен, Мур, Нильсон и другие на основе обширных экспериментальных исследований пришли к следующему заключению: износ резины – явление значительно более сложное, чем внешнее трение. Интенсивность изнашивания резин зависит от целого ряда факторов: коэффициента

трения, степени поврежденности материала, степени утомления материала, механизма износа, температуры, агрессивности внешней среды, физико-механических характеристик резины и т.д.

Так, Шалламах установил, что абразивное изнашивание резины происходит вследствие разрыва материала абразивными зернами; впоследствии часть резины отделяется от образца в виде продуктов износа.

Если износ резины происходит по абразивной шкурке, то на поверхности образца образуются поперечные полосы, так называемые полосы Шалламаха.

Крагельский И.В. и Е. Утияма считают, что при износе резин важную роль играют многократные деформации ее поверхностного слоя и предполагают, что в основе такого механизма износа лежат усталостные характеристики материала.

Резниковский М.М., Палмгрен, Мур, Нильсон и другие при исследовании фрикционного износа резин показали, что на поверхностном слое образца происходит образование складки и сворачивание ее в рулон.

Евстратов В.Ф. при исследовании износостойкости шин установил смешанный характер износа: наряду с усталостным механизмом износа существует также и абразивный износ.

Как видно, изнашивание резин является сложным многопараметрическим нелинейным процессом. При этом доминирующий механизм износа определяется совокупностью факторов: физико-механическими свойствами резины, параметрами нагружения, свойствами абразивной среды, температурой, внешней средой и т.д. Если говорить о конкретном предмете исследований, то бесспорным является следующее: при длительной работе мельниц преимущественным является усталостный гидроабразивный износ футеровок.

Созданию первых аналитических моделей эрозионного износа поверхностей под ударами твердых частиц предшествовал долгий период накопления экспериментальных данных и качественных умозаключений, нашедший отражение в обзоре [25]. Сначала цель экспериментаторов заключалась в том, чтобы найти физический параметр материала, определяющий его износостойкость. Ниже будут изложены новые выводы в этом направлении. С течением времени появлялись попытки создания механических моделей процесса износа в целом. Первая аналитическая модель принадлежит Финни [26], который рассматривал эрозионный износ как процесс резания и пластического деформирования. Была рассчитана траектория частицы, срезающей и переносящей материал, и определены потери объема вследствие эрозии:

$$V = \frac{mV_0^2}{\sigma_f kd} q(\alpha),$$

где m – масса частицы;

V_0 – скорость ударяющей частицы;

k – отношение вертикальной составляющей силы воздействия частицы к горизонтальной составляющей;

d – глубина среза;

σ_f – предел прочности материала поверхности;

$q(\alpha)$ – функция, характеризующая влияние величины угла падения частицы.

Этот подход оказался успешным для выяснения ряда особенностей процесса изнашивания, но при углах падения, близких к $\alpha = 90^\circ$ возникают количественные несоответствия, касающиеся влияния предела пластичности, показателя скорости и принципиальной применимости модели. В дальнейшем этот подход был усовершенствован, – в частности, показатель степени скорости заменен на 2,5, что позволило приблизиться к экспериментальным данным. Но в целом модель Финни имеет только историческое значение как первая попытка такого рода.

Следующий шаг был сделан Виттером [27], который рассматривал износ как сумму двух компонент – деформационного износа и срезывания, что подтвердилось на опытах. В основе модели лежит предположение, что тангенциальная и нормальная компоненты скорости V ударяющей частицы обуславливают различные виды износа, которые независимы между собой. Предполагается, что нормальная компонента удара приводит к образованию трещин усталостного или хрупкого разрушения на поверхности, тогда как тангенциальная компонента, ответственная за разрушение вследствие пластического деформирования.

При этом считается, что для обоих видов износа существуют определенные критические значения энергии E_f и E_s , которые необходимо затратить для удаления единицы изнашиваемого материала.

Таким образом, для суммарной массы эродированного материала в обоих случаях имеют место следующие выражения:

$$W_f = \frac{0,5M(V \sin \alpha - V_e)^2}{E_f};$$

$$W_s = \frac{0,5M(V^2 \cos^2 \alpha - V_p^2)}{E_s},$$

где M – общая масса ударившихся частиц;
 V_e и V_p – предельные значения скорости, при которых еще отсутствует эрозия.

По Виттеру износ невозможен, если соударение частицы с материалом носит характер упругого взаимодействия. Для металлов этот случай можно считать неправдоподобным. Однако такая концепция может использоваться при попытке объяснить износ полимеров.

Очевидно, что использование модели Виттера для прогнозирования результатов процесса эрозии возможно только при наличии предварительно найденных из эксперимента значений констант E_f , E_s , V_e и V_p . Но даже и при выполнении этого условия прогнозируемые величины могут в несколько раз отличаться от фактически наблюдаемых. Поэтому широкого распространения эта модель не получила. Следует подчеркнуть, что обе модели, и Финни, и Виттера создавались, в основном, в расчете на изучение эрозии металлических поверхностей. Такую же цель преследует и недавно появившаяся модель Бекмана-Готцмана [28], не требующая знания трудоемких эмпирических констант. Впрочем, указанные авторы объявили о возможности модифицирования их модели с целью применения ее для исследования эрозионного износа полимерных материалов. Но такая возможность остается пока что гипотетической.

Численная модель ударного эрозионного износа, принадлежащая Е.Ф. Непомнящему [29], также вначале использовалась для изучения эрозии металлических поверхностей. В ее основе лежит представление об усталостной природе разрушения поверхностного слоя материала, что имеет место не только для металлов, но и для широкого круга других материалов. Поэтому, в работе [29] эта модель была приспособлена для расчета эрозии поверхностей полимерных материалов. Наиболее важная эмпирическая константа данной теории, это – оцениваемый из экспериментальных данных обобщенный коэффициент трения:

$$f = \frac{V_0 \cos \alpha_0 - V_k \cos \alpha_k}{V_0 \sin \alpha_0 - V_k \cos \alpha_k},$$

где V_0, V_k – скорость частицы перед соударением с поверхностью и после него;

α_0, α_k – соответствующие углы наклона траектории к плоскости.

Модель отличается аналитической разработкой и введением ряда вспомогательных констант. Однако ряд выводов на ее основе явно расходится с опытом, например, теоретическое предсказание о независимости интенсивности износа от размеров частиц. В целом результаты расчетов на основе этой модели только качественно согласуются с

экспериментальными данными по износу резин, пластмасс, технически чистых металлов и металлических сплавов. К тому же с увеличением угла атаки α_0 контактные напряжения и деформации возрастают и могут достичь разрушающих напряжений, при которых изменяется сам механизм изнашивания – происходит переход от усталостного износа к микрорезанию.

Поэтому задачу создания количественной аналитической модели, пригодной для достаточно точного описания процесса эрозионного износа полимерных материалов под ударами твердых частиц и кусков нельзя считать уже нашедшей свое разрешение. Не исключено, что такое положение создалось из-за того, что до сих пор при исследовании процессов эрозионного износа не использовались наиболее прогрессивные современные физические теории разрушения, и, в первую очередь, термофлуктуационная теория С.Н. Журкова.

Известно, что для процесса абразивного износа резины характерно существование начального инкубационного периода, в течение которого материал может интенсивно поглощать энергию ударяющихся частиц, не подвергаясь при этом заметным макроскопическим изменениям. Но вслед за этим, начиная с некоторого момента, развивается процесс интенсивного разрушения поверхности. В течение упомянутого периода происходит накопление усталостных микроповреждений.

Как отмечалось в [30-32], уровень теоретико-экспериментальных исследований в этой области не позволяет объяснить начальный процесс явления усталости. Установлено, что «нужно чтобы материал в целом устал, т.е. чтобы в нем появились рассеянные начальные повреждения с достаточной концентрацией и эти повреждения изменили бы физико-механические свойства материала». Физическая природа таких повреждений до сих пор остается неустановленной, но считается, что «для выяснения механизма износа пластиков и эластомеров недостаточно знать изменения макроскопических параметров (E , σ , μ , t) и режима износа (T , V), но важно учитывать также изменение структуры материала в результате физико-химических процессов» [30-32]. Хотя существующая термофлуктуационная теория разрушения «призвана объяснить с молекулярной точки зрения усталостный механизм износа, количественно они не согласуются» [33]. Тем не менее, авторы работы [33] могли прийти к следующим важным выводам: ведущим фактором, определяющим износ резины, является температура контактирующих поверхностей; элементарные акты износа протекают в условиях значительных температур в пятнах касания.

Последнее указание насчет значения локальных температурных всплесков может быть положено в основу физического моделирования

начальных актов износа при изучении механизма эрозионного разрушения. Для этого сначала отметим, что проблема происхождения местных подъемов температуры в рассеянных центрах – в «горячих точках» – стоит в центре внимания современной физики детонации промышленных взрывчатых веществ. Так, Ф. Боуден в ряде классических исследований выдвинул свою концепцию горячих очагов как точек адиабатического разогрева газовой фазы [34]. Однако новые исследования показали недостаточность такого истолкования, и поэтому в работе [35] были высказаны соображения относительно возможности разогрева локальных очагов на фронте инициирующего ударного импульса вследствие перераспределения кинетической энергии массового движения вещества, концентрирующейся в окрестности схлопывающихся микрокаверн, рассеянных в материале. Иначе говоря, утверждается, что «горячие точки» – это следы, оставшиеся на месте залеченных ударом микропор типа микротрещин Гриффитса.

Подобные же соображения, естественно, могут быть перенесены на ситуацию, возникающую при ударе твердого куска или абразивной частицы по поверхности полимерного покрытия, что позволяет выдвинуть новую гипотезу о термической природе эрозионного износа полимеров.

Предварительно отметим, что в недавних экспериментальных работах исследовались экзотермические эффекты при разрыве резины [36] и других полимеров. Были зафиксированы температурные вспышки ΔT с величиной порядка нескольких сотен градусов в вершине распространяющейся трещины. Имея в виду, что в поле упругих напряжений исходные микротрещины могут не только расти, увеличиваясь в размерах, но и сокращаться вплоть до почти полного исчезновения, если приложены достаточно высокие сжимающие напряжения [37]. Рассмотрим схему удара абразивной макрочастицы о слой полимерного покрытия.

В момент удара частицы со скоростью V от точки контакта начинает распространяться волна упругих напряжений с интенсивностью, зависящей от величины V и механических характеристик материала.

В диапазоне умеренных скоростей удара можно использовать для оценки величины упругих сжимающих напряжений σ в окрестности точки 0 схему соударения абсолютно жесткого тела с упругим полупространством, характеризующимся модулем упругости E и плотностью ρ [38]. Соответствующее выражение имеет вид

$$\sigma = V \sqrt{\rho E},$$

что удобнее записать в виде отношения

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{\rho V^2}{E}}.$$

Известно, что в твердых пластиках, как и в других твердых телах, всегда присутствуют начальные дефекты, микропоры типа микротрещин Гриффитса с размерами порядка 10^{-3} мм. В силу незначительных размеров они не искажают картину распространения волновых возмущений, но могут служить концентраторами напряжений, а также увеличиваться в размерах или сокращаться в зависимости от величины и знака приложенных нагрузок. Значительного сокращения и исчезновения («залечивания») начальных микротрещин в поле динамических напряжений можно ожидать, если величина сжимающих напряжений соизмерима с величиной модуля упругости $\sigma \cong E$.

Пользуясь этой формулой и подставляя в нее характерные, например, для резин значения $\rho = 1,3$ г/см³ и $E = 50$ кг/см², получим в случае скорости удара $V = 20$ м/с значение $\sigma/E \cong 2$. Следовательно, можно считать, что при типичных условиях удара абразивной частицы по высокоэластичному покрытию вблизи точки соударения создаются возможности для залечивания микротрещин. Подобная картина может иметь место для термопластов, поскольку любой процесс развития трещины связан с преобразованием энергии из одной формы в другую. В соответствии с первым законом термодинамики, величину поверхностной энергии исходной трещины можно считать минимальной оценкой энергии, пошедшей на разогрев материала в окрестности схлопнувшейся трещины, что позволяет сразу записать элементарную оценку величины подъема температуры в случае сферической микрокаверны с радиусом R , полагая, в первом приближении удельную теплоемкость материала c постоянной величиной [35]:

$$\Delta T = \frac{3\gamma}{\rho c R}, \quad (1)$$

где ρ – удельная поверхностная энергия материала.

Оценим с помощью (1) локальный разогрев для типичного полимера ($\rho = 1,8$ г/см³, $c = 0,3$ кал/г·град.), взяв в качестве R значения 10^{-3} мм и воспользовавшись для γ усредненной экспериментальной оценкой $\gamma \cong 5 \cdot 10^5$ эрг/см² [39]. Подставляя указанные значения, придем к оценке $\Delta T \sim 600$ °С.

Полученный результат можно рассматривать как указание на тот факт, что при захлопывании микрокаверн вследствие удара подъем температуры в возникающем локальном очаге разогрева может достигать нескольких сотен градусов. Поскольку при таких температурах

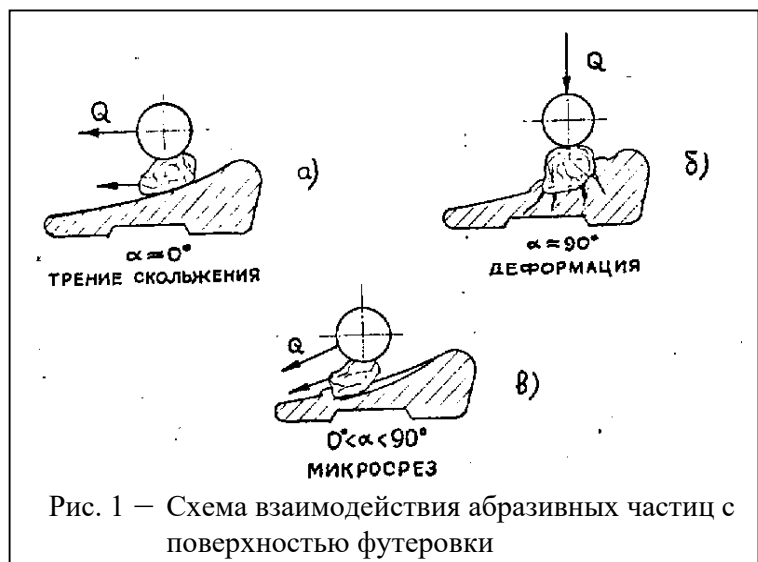
углеводородные пластики претерпевают термический пиролиз, распадаясь на элементарные компоненты вплоть до газообразного водорода и сажи [40], естественно предположить, что удар абразивной частицы способен приводить к пиролитическим превращениям полимерного покрытия в местах существования локальных очагов разогрева вблизи точки соударения. Эта гипотеза может быть положена в основу объяснения физической природы усталости полимерного материала, подвергающегося процессу эрозии под действием многократных ударов абразивных частиц и кусков. Действительно, с этой точки зрения, начальный индуктивный период процесса изнашивания может заключаться в накоплении микроскопических полостей, заполненных деструктурированными продуктами термического пиролиза. Подобное накопление при стационарном процессе изнашивания должно продолжаться без видимых макроскопических повреждений вплоть до критического момента, когда материал покрытия оказывается «изъеденным», т.е. насыщенным микрокавернами, содержащими продукты пиролиза, до такой степени, что его механическая прочность оказывается недостаточной для поддержания целостности покрытия. С этого момента скорость изнашивания начинает резко возрастать, а его результаты оказываются все более заметными и приводят в конце концов конструкцию к выходу из строя.

Суть высказанных предположений о природе эрозионного изнашивания полимерных материалов состоит в том, что этот процесс не является чисто механическим, а включает в себя термические превращения материала. Таким образом может найти объяснение тот факт, что при прочих равных условиях более износостойкими оказываются полимеры, обладающие повышенной термической устойчивостью.

Рассмотрим некоторые проблемы гидроабразивного износа футеровок барабанных мельниц.

В барабанной мельнице можно выделить, по крайней мере, три механизма взаимодействия обрабатываемой среды с поверхностью резиновой футеровки (рис. 1).

При углах атаки $\alpha = 0$ (рис. 1, а) наблюдается в основном трение скольжение. При $\alpha = 90^\circ$ (рис. 1, б) происходит преимущественно



ственно усталостное разрушение резины; абразивная частица внедряется в материал, деформирует его, благодаря чему образуется лунка. Выдавленная при этом резина образует вокруг лунки валик. В этом случае превалирует усталостный механизм износа.

Наиболее распространенный смешанный механизм износа наблюдается при углах атаки $0 < \alpha < 90^\circ$ (рис. 1, в).

В этом случае износ можно представить как вдавливание частицы в поверхность футеровки и разрушение микрообъема материала. При рассмотрении процесса износа уместно сделать следующие теоретические допущения: абразивная частица имеет шарообразную форму; угол входа абразивной частицы в материал равен углу выхода; для упрощения расчета объем поврежденного материала выражается через объем двух трехгранных пирамид с общим основанием, находящемся в месте наибольшего внедрения частицы и на одинаковом расстоянии от вершин.

При определении режущего давления силы удара и прочностных свойств абразивной частицы и изнашиваемого материала использованы известные закономерности [41-43]. В результате была получена следующая зависимость

$$W_0 = 3,4 \cdot 10^{-4} k \gamma^{\frac{5}{3}} \nu^{\frac{10}{3}} D^3 \sin^{\frac{5}{3}} \alpha \operatorname{ctg} \alpha c_{\text{п}}, \quad (2)$$

где W_0 – величина объемного гидроабразивного износа от единичной частицы;

k – коэффициент, учитывающий разность объемов конуса и трехгранной пирамиды;

γ – плотность абразивной частицы;

ν – скорость движения абразивной частицы;

α – линейный размер частицы (диаметр);

D – угол атаки;

$c_{\text{п}}$ – коэффициент, характеризующий физико-механические свойства изнашиваемого материала и абразивной частицы.

Как следует из выражения (2), величина объемного гидроабразивного износа существенно зависит от скорости движения частицы, ее размера и удельного веса. Угол атаки, соответствующий наибольшим величинам износа, находился в пределах $35-45^\circ$ (рис. 2). Величина износа, рассчитанная по зависимости (2), будет максимальной при угле атаки равном 39° .

Влияние крупности частиц на величину износа менее ощутимо при значениях порядка (0,1-0,15) мм. Однако в промышленных условиях в шаровых мельницах наибольшее процентное содержание ча-

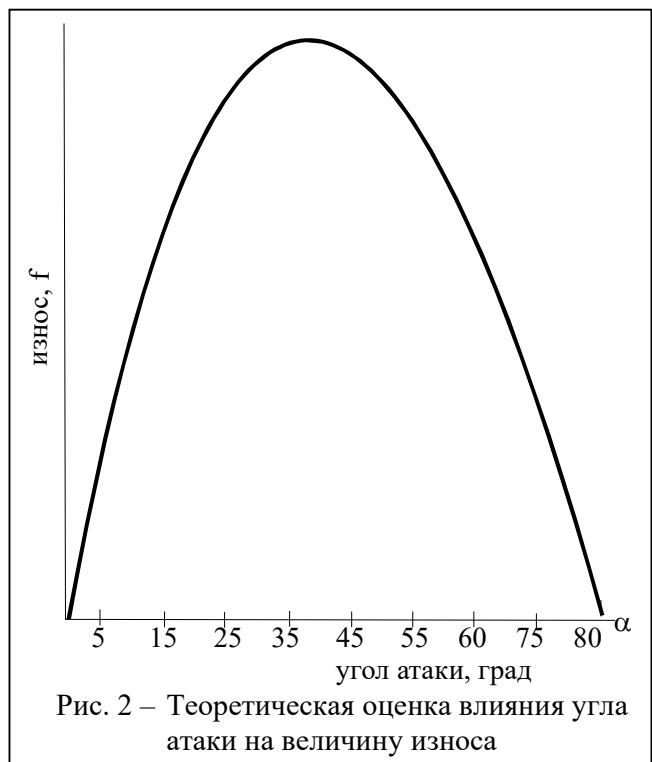
стиц крупностью (0,3-6,0) мм [44], и их влияние на величину гидроабразного износа довольно значительное. Гидроабразивный износ пропорционален скорости движения частиц в степени 3,3. Таким образом, выражение (2) позволяет провести качественную оценку влияния некоторых факторов на процесс гидроабразивного износа материалов.

Во время работы шаровой мельницы стальные шары поднимаются выше слоя руды и при достижении определенной высоты свободно падают на размалываемый слой руды и на открытую часть футеровки. При этом футеровка испытывала ударные нагрузки. Рассмотрим сопротивляемость удару футеровок, изготовленных из резин 4-54, 2-529, 1801-6.

Испытания образцов в зависимости от требуемого усилия проводились на гидравлических прессах ЦД-40 и ЦДМ-200 с измерением деформации при помощи индикатора часового типа. С целью исключения эффекта на торцах и всевозможных перекосов образец устанавливался между шлифованными дисками, на которые передавалось усилие через сферические наконечники. Боковая поверхность не имела направляющих и могла свободно расширяться при сжатии. Для уравнивания внутренних напряжений по высоте образца измерение производили после 30-секундной выдержки под нагрузкой.

Исследованиями, установлено, что при относительной деформации до (30-35) % остаточная деформация после снятия нагрузки практически отсутствует. При сжатии до (60-65) % наблюдается остаточная деформация в пределах (2-3) %. Статическое сжатие до (90-95) % приводит к внутренним изменениям и потере упругого состояния, остаточная деформация составляет (20-35) %, а образцы не восстанавливают первоначальной формы.

В результате обработки экспериментов установлена взаимосвязь между относительным сжатием ε и напряжением σ в диапазоне от 0 до 225 кН/см², которая может быть выражена эмпирической зависимостью



$$\varepsilon = \frac{\alpha}{K_T} \sigma^{\alpha x_n} \ln \sigma, \quad (3)$$

где K_T – коэффициент, зависящий от твердости резины;

α – постоянный показатель (для рекомендованных резин $\alpha = 0,1$);

x_n – показатель, зависящий от напряжения $\left(x_n = 1 - \frac{\ln \sigma}{10} \right)$;

$\ln \sigma$ – натуральный логарифм предельного напряжения, принятого по эксперименту.

Поправочные коэффициенты K_T на величину относительного сжатия резины в зависимости от ее твердости приведены в таблице 1.

Таблица 1

Твердость резины по Шору А	15	30	40	50	60	70	80	95
Поправочный коэффициент K_T	1,54	1,38	1,20	1,10	1,0	0,75	0,55	0,3

Таким образом, задаваясь напряжением в зоне $\sigma_{дон}$ для данной резиновой смеси, можно с достаточной точностью определить ожидаемую осадку различных футеровок и других деталей, работающих на сжатие при статических нагрузках. Это позволит правильно выбирать толщину футеровки в зависимости от проектируемой нагрузки.

Исследования влияния удара на состояние резины проводились на вертикальном копре (рис. 3), который состоял из массивной плиты 4, ограничивающего устройства 3, стоек 2, подвижной рамы 1, устройства 7, обеспечивающего получение одиночного удара шаром 6. На плите располагались предназначенные для испытаний резиновые листы 5.

Энергия удара A определялась кинетической энергией шара вместе с хвостовиком в момент удара, а глубина лунки – по отпечатку ее сферической поверхности. Зная максимальный диаметр отпечатка, глубину лунки можно определить следующим образом:

$$Z = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - K^2} \right), \quad (4)$$

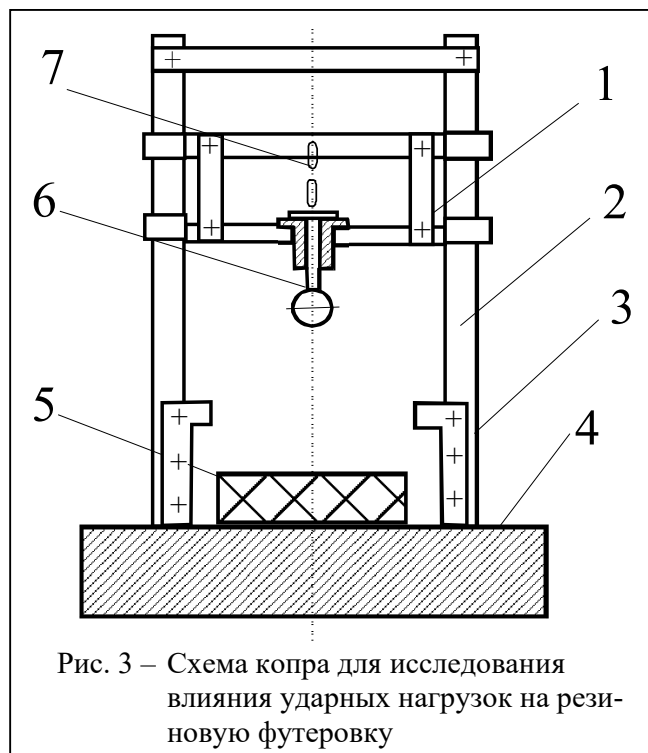


Рис. 3 – Схема копра для исследования влияния ударных нагрузок на резиновую футеровку

где D – диаметр шара;

K – отношение диаметра сферической поверхности лунки к диаметру шара.

Сопrotивляемость резины ударным нагрузкам характеризуется коэффициентом сопротивляемости удару I_{∂} , представляющим отношение энергии удара к глубине лунки.

В результате обработки экспериментальных данных получена следующая эмпирическая зависимость для расчета коэффициента сопротивляемости удару:

$$I_{\partial} = A^{x_m} K_T, \quad (5)$$

где показатель степени

$$x_m = 1 - \frac{\ln Z}{11,5}. \quad (6)$$

При исследовании коэффициента сопротивляемости удару было замечено, что по мере увеличения энергии удара на поверхности резины вначале появляются отдельные пятна в виде местного смятия, затем очень мелкие трещины, переходящие в явно выраженные сквозные. Все виды перечисленных повреждений возникли в зоне наибольших деформаций при определенной величине мгновенного сжатия: местное смятие наблюдалось при сжатии резины на (30-35) % номинальной ее толщины, микротрещины – при сжатии на (40-45) % и явные трещины появлялись при сжатии на (50-55) %. Повреждаемость резины от удара всегда наступала при сжатии резины на (30-35) %, тогда как статическое нагружение не вызывало повреждения при деформации до (60-70) %.

Наличие повреждений от удара можно объяснить отставанием скорости деформации резины от скорости внедрения в нее шара. В момент образования углубления резина не только сжимается, но и растягивается по сферической поверхности лунки.

Анализ экспериментальных данных показал, что с увеличением толщины коэффициент сопротивляемости удару уменьшается, т.е. при одной и той же величине энергии удара глубина погружения шара в резину увеличивается. Резкое снижение коэффициента сопротивляемости наблюдалось до толщины резины (20-25) мм. С увеличением толщины резины свыше (20-25) мм величина коэффициента сопротивляемости изменялась незначительно. При малых толщинах резины и больших энергиях удара, несмотря на высокую величину коэффициента сопротивляемости, относительные деформации превышали допустимые, что приводило к разрушению резины.

Было также установлено, что коэффициент сопротивляемости удару при одних и тех же значениях энергии удара и толщине резины свыше 25 мм практически не зависит от диаметра шара. Можно сделать вывод, что коэффициент сопротивляемости удару при толщине резины 25 мм и выше, в основном, зависит от энергии удара и физико-механических свойств резины. Установлено, что допускаемые напряжения при ударном вдавлении в резину должны быть не более (2,5-2,8) кН/см² и соответственно максимально допускаемая деформация – (0,25-0,30).

Проведенные исследования по определению коэффициента сопротивляемости резины удару позволили установить взаимосвязь между энергией удара, относительным сжатием резины и ее прочностью.

Зная расчетную величину коэффициента сопротивляемости удару и допускаемую величину относительного сжатия $\varepsilon_{\text{дон}}$, можно определить необходимую минимальную толщину резиновой футеровки:

$$S_{\text{min}} = \frac{Z}{\varepsilon_{\text{дон}}}, \quad (7)$$

где

$$Z = \frac{A}{I_{\text{д}}}.$$

Подставляя в выражение (7) значение Z с учетом выражения (5), получим

$$S_{\text{min}} = \frac{A^{1-x_m}}{\varepsilon_{\text{дон}} K_T}. \quad (8)$$

Выбранная по этой зависимости толщина резиновой футеровки способна противостоять лишь ударному нагружению без разрушения резины. При назначении рабочей толщины футеровки следует найденное значение увеличить с учетом износа (срока службы) и способа ее крепления.

Исследования передачи энергии удара проводились с помощью приспособления (рис. 4) к вертикальному копру. Удары по специальным эталонным образцам 3 наносились как с резиновой прокладкой

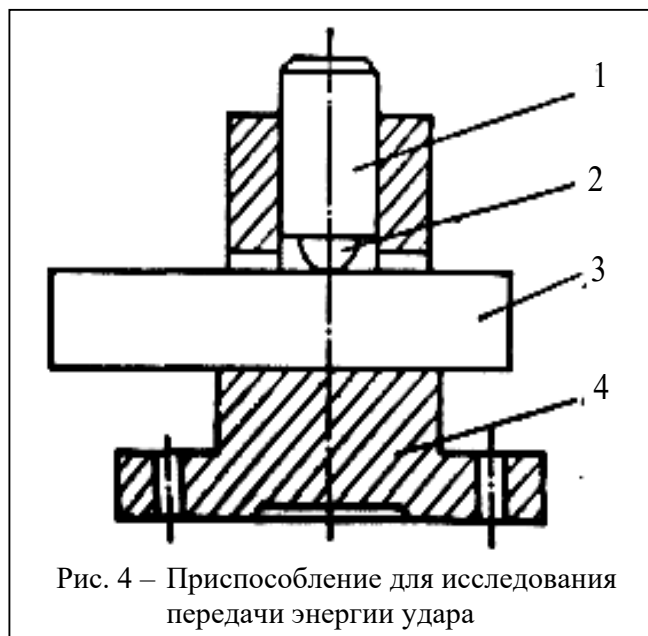


Рис. 4 – Приспособление для исследования передачи энергии удара

различной толщины, так и непосредственно по пуансону 1. Величина площади лунок, оставленных шариком 2 пуансона, в обоих случаях позволяла судить об энергии, переданной через резину.

Коэффициент передачи энергии удара определяется из соотношения

$$K_n = \frac{A_n}{A}, \quad (9)$$

где A_n – энергия удара, передаваемая стальному образцу при наличии резиновой прокладки;

A – энергия, воспринимаемая стальным образцом без прокладки.

Результаты проведенных экспериментов приведены в табл. 2. Обработка полученных данных позволила установить эмпирическую зависимость для расчета коэффициента передачи энергии удара:

$$K_n = \eta A^{S^{0,65}}, \quad (10)$$

где η – коэффициент, зависящий от твердости резины (при твердости 58–62 по Шору $\eta = 0,1$);

S – толщина резиновой прокладки.

Таким образом, энергия, переданная на металлическую конструкцию оборудования, определяется выражением

$$A_n = \eta A^{\left(1 + \frac{1}{S^{0,65}}\right)}. \quad (11)$$

Таблица 2 – Коэффициент передачи энергии удара через резиновую прокладку

Энергия удара, Дж	K_n при толщине резиновой прокладки, мм				
	6	10	20	50	80
6,5	0,36	0,25	0,165	0,139	0,128
13,0	0,45	0,29	0,179	0,147	0,133
14,7	0,47	0,30	0,182	1,149	0,135
18,2	0,50	0,31	0,186	0,151	0,136
19,5	0,51	0,32	0,188	0,152	0,137
26,0	0,56	0,33	0,194	0,156	0,139
27,3	0,57	0,34	0,196	0,156	0,140
29,5	0,58	0,35	0,197	0,157	0,140
32,5	0,60	0,35	0,200	0,158	0,141
36,3	0,62	0,36	0,202	0,160	0,142
39,0	0,68	0,37	0,204	0,161	0,143
45,5	0,67	0,38	0,208	0,163	0,144
52,0	0,69	0,39	0,211	0,164	0,155
54,4	0,70	0,40	0,213	0,165	0,146
59,0	0,72	0,40	0,215	0,166	0,146
63,5	0,74	0,41	0,216	0,167	0,147
73,3	0,77	0,43	0,220	0,169	0,148
88,5	0,82	0,44	0,225	0,172	0,150
103,2	0,85	0,45	0,230	0,171	0,152
118,0	0,87	0,47	0,236	0,173	0,154

Примечание. Ниже разделительной линии резина не выдерживает удара, появляются трещины.

Из анализа экспериментальных данных и выражения (11) видно, что зависимость коэффициента передачи энергии удара от толщины резиновой прокладки имеет такой же вид, как и коэффициента сопротивляемости удару. В начальный момент с увеличением толщины происходит резкое уменьшение коэффициента передачи энергии, а после толщины (20-25) мм кривая выполаживается, и величина коэффициента передачи энергии удара при одном и том же значении начальной энергии уменьшается незначительно. Проведенные дополнительные исследования при ударе через резиновую прокладку толщиной 0,32; 0,5 и 1,0 м показали, что для этих значений толщин коэффициент передачи удара оставался постоянным при одной и той же величине энергии удара. Это может быть объяснено тем, что при больших толщинах резиновых прокладок коэффициент сопротивляемости удару остается практически постоянным. Следовательно, минимальная толщина резиновой футеровки из условия передачи энергии удара должна быть не менее 25 мм и может быть рассчитана по выражению (9).

Замена металлической футеровки на резиновую целесообразна при соблюдении определенных граничных условий, которыми являются: энергия удара, скорость соударения, твердость резины, конструктивные особенности футеровки. Экспериментальные и промышленные исследования показали, что резина способна противостоять ударным нагрузкам, если не будут превышены следующие допускаемые величины: энергия удара – (80-100) Дж, скорость – (6-12) м/с и относительное сжатие – (0,25-0,30).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И.В. О природе трения полимеров // *Механика полимеров*. – 1972. – № 5. – С. 797-808.
2. Повышение износостойкости горно-обогатительного оборудования / Под ред. Н.С. Пенкина. –М.: Недра, 1992. –265 с.
3. Пенкин Н.С. Износостойкость гуммированных деталей машин в абразивных средах: Автореф. дис. доктора техн. наук: 05.02.04. –Москва, 1978. – 47 с.
4. Ковалев П.А. Кавитационная эрозия и кавитационно-абразивное изнашивание резин: Автореф. дис. канд.техн. наук: 05.02.04. – Ростов-на-Дону, 1988. – 18 с.
5. Голощапов 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.
6. Копченков В.Г. Энергетический подход к оценке износостойкости резины. – Ставрополь: Изд. СевКавГТУ, 2003. – 198 с.
7. Копченков В.Г. Определение коэффициента механических потерь при косом ударе // *Каучук и резина*. – 2000. – № 3. – С. 18-20.
8. Копченков В.Г. Модели изнашивания резины для прямого удара потоком частиц // *Каучук и резина*. – 2003. – № 4. – С. 25-28.
9. Копченков В.Г. Механизм разрушения высокоэластичного полупространства цилиндрическим индентором при многоцикловом нагружении / В.Г. Копченков // *Сер. Естественнонаучная: Сб. науч. тр. СтГТУ*. – Ставрополь, 1998. – Вып. 1. – С. 35-43.
10. Копченков В.Г. Микроскольжение при прямом упругом ударе абразивной частицы // *Сер. Естественнонаучная: Сб. науч. тр. –СтГТУ*. –Ставрополь, 1999. –Вып. 2. – С. 8-12.
11. Копченков В.Г. Относительное скольжение при косом ударе // *Сер. Естественнонаучная: Сб. науч. тр. –*

- Ставрополь, 1999. – Вып. 3. – С. 10-14.
12. Копченков В.Г. Траектория движения абразивной частицы при косом ударе по материалу с несовершенной упругостью // Сер. Естественнонаучная: Сб. науч. тр. – Ставрополь, 1999. – Вып. 3. – С. 5-10.
 13. Анализ моделей для описания удара твердой частицы по резиновой поверхности / В.Г. Копченков, Е. Сучков, С. Лихачев // Сер. Естественнонаучная: Сб. науч. тр. СевКавГТУ. – Ставрополь, 2000. – Вып. 4. – С. 14-18.
 14. Влияние физико-механических свойств резин на коэффициент трения при ударе / В.Г. Копченков, В.В. Городецкий // Сер. Естественнонаучная: Сб. науч. тр. СевКавГТУ. – Ставрополь, 2001. – Вып. 5. – С. 5-9.
 15. Теоретические основы формирования направления трещин при эрозионном изнашивании резин / В.Г. Копченков, В.П. Лагутин // Сер. Естественнонаучная: Вестник СевКавГТУ. – Ставрополь, 2003. – № 1(6). – С. 12-17.
 16. Механизм изнашивания эластомерных материалов под воздействием транспортируемых абразивных сред / В.Г. Копченков, В.М. Сербин, Н.С. Пенкин // Сб. докл. Междунар. конгресса «Механика и трибология транспортных систем». – Ростов/Дон. – 2003. – Т. 2. – С. 27-30.
 17. Копченков В.Г. Влияния фрикционного контакта на траекторию движения твердой частицы при ударе // Механика и физика фрикционного контакта: Межвуз. сб. науч. тр. – Тверь, 2000. – Вып. 7. – С. 8-13.
 18. 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.
 19. Влияния фрикционного контакта на траекторию движения твердой частицы при ударе / В.Г. Копченков, Н.С. Пенкин // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 6. – С. 649-664.
 20. Копченков В.Г. Теоретико-экспериментальное исследование образования трещин при ударе твердой частицы по поверхности резины // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 6. – С. 623-628.
 21. Копченков В.Г. Влияния вида фрикционного контакта на величину коэффициента механических потерь // Механика и физика фрикционного контакта: Межвуз. сб. науч. тр. – Тверь, 2002. – Вып. 9. – С. 20-25.
 22. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. – С. 480.
 23. Schalamax A. // Proc. Phys. Soc. –1953. –V. 66. –386 с.
 24. Бартнев Г.М. // ВМС. –1965. –№ 7. –992 с.
 25. Чижик Е.Ф., Коротышев Е.В., Хабло Г.П. Предпочтительная концепция о футеровках с магнитными элементами // Дробильно-размольное оборудование и технология дезинтеграции. – Ленинград. –1989. –С. 64-70.
 26. Finnic I. Erosion of surfaces by solid particles. –Wear: 1960. –V. 3. –S. 87-103.
 27. Bitter J.G.A. A Study of erosion phenomena. –Wear: 1963. –V. 6. –S. 5-20.
 28. Beckmann G., Gotzman J.. Analytische Betrachtung zum Strahlverschleiss von Metall // Schmierungstechnik. – 1979. –V. 10, N 3. –S. 73-77.
 29. Непомнящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц // Контактное взаимодействие твердых тел. –М., 1971. –С. 190-200.
 30. Вилли К. Биология. –М.: Мир, 1968. –С. 808.
 31. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. –М.: Машиностроение, 1977. –216 с.
 32. Дырда В.И. Резиновые элементы вибрационных машин. –Киев: Наукова думка, 1980. –100 с.
 33. Стеллер Е.Е., Ратнер С.Б. Закономерности ударного трения и изнашивания полимерных материалов // Труды ВНИИПТУглемаш. –М., 1979. –Вып. 31. –С. 34-66.
 34. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых телах. –М.: ИЛ, 1962. –310 с.
 35. Бартнев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. –Л.: Химия, 1972. –250 с.
 36. Баранов Е.Г., Оберемок О.Н., Семенюк Е.А. Роль поверхностной энергии при разогреве горячих точек // Физика горения и взрыва. –1981. –№ 5. –С. 85-92.
 37. Дырда В.И. Исследование локальных экзотермических эффектов при разрушении резины // Проблемы прочности. –1982. –№ 7. –С. 102-104.
 38. Эрдоган Ф. Теория распространения трещин // Разрушение; ред. Г. Либовиц. –М., 1975. –Т. 2. –С. 372-430.
 39. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. –М.: Наука, 1977. –235 с.
 40. Берри Дж. Разрушение стеклообразных полимеров // Разрушение; ред. Г. Либовиц. –М., 1976. –Т. 7. –С. 7-66.
 41. Билик И.И. Абразивно-жидкостная обработка металлов. – М.: Машгиз, 1960.
 42. Борохович И.А. Теоретические закономерности абразивного износа центробежных насосов // Труды Магнитогорского горно-металлургического института. –1963. –№ 27.
 43. Чижик Е.Ф., Горбач Б.М. Теоретическое исследование процесса гидроабразивного износа // УкрНИИНТИ. Реферативная информация. – Киев: Вища школа, 1971. – Вып. 5. –
 44. Губин Г.В. и др. Разработка технологии получения концентратов с содержанием железа свыше 65 % из магнетитовых кварцитов // Обогащение и окускование руд черных металлов. – М.: Недра, 1970.