

О применении волновой теории удара при расчете резиновых футеровок измельчительного оборудования, работающих в условиях ударно-абразивного износа

Рассмотрена возможность теоретического расчета резиновых футеровочных плит на основе волновой теории удара.

ударно-абразивный износ, резиновая футеровка, волновые процессы, мельница.

Одной из мировых тенденций улучшения показателей технического уровня измельчительного оборудования является создание машин, реализующих уже известные принципы работы, но с применением новых конструкционных материалов. Такие решения могут быть быстро внедрены в практику, так как основная конструкция машины производством уже освоена. Применительно к барабанным и трубным мельницам актуальной проблемой является выбор материалов футеровочных элементов рабочих поверхностей, обеспечивающих долговечную работу оборудования в условиях ударно-абразивного и гидроабразивного износа [1, 2].

Как правило, износостойкость материалов подверженных абразивному и ударно-абразивному изнашиванию связывают с его твердостью. В тоже время накоплен значительный положительный опыт использования резин в качестве материала футеровок рабочих поверхностей измельчительного, транспортного и сортирующего оборудования.

Для более широкого внедрения резиновых футеровок барабанных и трубных мельниц в первую очередь необходимо преодолеть инерцию мышления многих конструкторов и механиков измельчительного оборудования, которые считают, что резина как конструкционный материал не может конкурировать по износостойкости с металлами в условиях ударно-абразивного износа.

Для обоснования стойкости резиновых футеровок в условиях ударно-абразивного износа, авторами применен волновой подход, который более известен при разработке механизма взрывного разрушения горных пород [3].

Считаем, что передача энергии при внедрении в поверхность частиц сферической формы аналогична передаче энергии среде при взрыве сферического заряда, и учитываем только поперечные ударные волны.

В этом случае величина передаваемой среде кинетической энергии

$$\mathcal{E} = \rho \cdot f(R) \cdot e^{-2\beta \cdot \tau} \cdot \sin p\tau \quad (1)$$

где $f(R)$ – функция расстояния,

β – коэффициент затухания,

τ – отсчет времени с момента прихода волны,

p – циклическая частота импульса,

ρ – плотность материала.

Циклическая частота импульса определяется по формуле

$$P = a \cdot \left(\frac{2 \cdot E \cdot R}{\eta \cdot a} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \div R \quad (2)$$

где a – скорость продольной волны,
 E – модуль упругости первого рода,
 η – коэффициент динамической вязкости.

Длина волны определяется из условия

$$P \cdot \tau = \pi \cdot k \quad (3)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ числа натурального ряда.

Подставляя в (3) значение по (2) имеем

$$\pi \cdot k = a \cdot \tau \cdot \left(\frac{2 \cdot E \cdot R}{\eta \cdot a} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \div R \quad (4)$$

Уравнение (4) распадается на два уравнения

$$\frac{a \cdot \tau}{R} = \pi \quad (5)$$

В уравнении (5) произведение $a \cdot \tau$ представляет собой длину волны на расстоянии от центра контакта. В уравнении (6) величина k является порядковым номером волны.

Из уравнения (6) находим расстояние, на которое переместилась волна к моменту τ

$$R = \frac{\eta \cdot a \cdot (k^2 + 1)}{2 \cdot E} \quad (7)$$

Соответственно время действия волны на расстоянии R равно

$$\tau = \frac{\pi \cdot R}{a} \quad (8)$$

Введем обозначение

$$\frac{\eta \cdot a}{2 \cdot E} = M \quad (9)$$

где M – есть метрика пространства применительно к конкретным условиям удара.

Перепишем формулы (7) и (8) к виду

$$R = M \cdot (k^2 + 1) \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot M \cdot (k^2 + 1)}{a} \quad (11)$$

В таком виде формула (10) выражает расстояние в метриках M , а формула (11) – продолжительность действия волны на расстоянии R .

Соответственно частота ν равна

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{a}{\pi \cdot M \cdot (k^2 + 1)} \quad (12)$$

Величина плотности энергии, выраженная через частоту

$$\mathcal{E} = H \cdot \nu^2 = \frac{H \cdot a^2}{\pi^2 \cdot M^2 \cdot (k^2 + 1)} \quad (13)$$

Используя начальные условия ($K = 0$; $\mathcal{E} = \mathcal{E}_\tau$) находим постоянную H

$$H = \pi^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\mathcal{E}_\tau}{a^2} \quad (14)$$

где \mathcal{E}_τ – плотность энергии в зоне контакта частицы с поверхностью определяется по формулам приведенным в [3].

С учетом (14) формула (13) принимает вид

$$\mathfrak{E} = \frac{\mathfrak{E}_T}{(k^2 + 1)^2} \quad (15)$$

Таким образом, получается обобщенное пространство существования зон концентрации энергии, выражаемое в метриках расстояния M , т.е. $1M$, $5M$, $10M$, $17M$, $26M$, $37M$, $50M$. Соответствующие им значения плотности энергии, выраженные в долях от начальной плотности энергии удара, равны: \mathfrak{E}_T , $\mathfrak{E}_T/4$, $\mathfrak{E}_T/25$, $\mathfrak{E}_T/100$, $\mathfrak{E}_T/289$, $\mathfrak{E}_T/676$, $\mathfrak{E}_T/1369$, $\mathfrak{E}_T/2500$... (рис. 1).

Если плотность энергии в зоне контакта меньше теоретической энергоемкости разрушения, метрика расстояния принимается равной радиусу зоны контакта, рассчитываемой согласно [5] по формуле

$$r = 0,66 \cdot D \cdot \rho^{\frac{1}{5}} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \cdot V_1^{\frac{2}{5}} \quad (16)$$

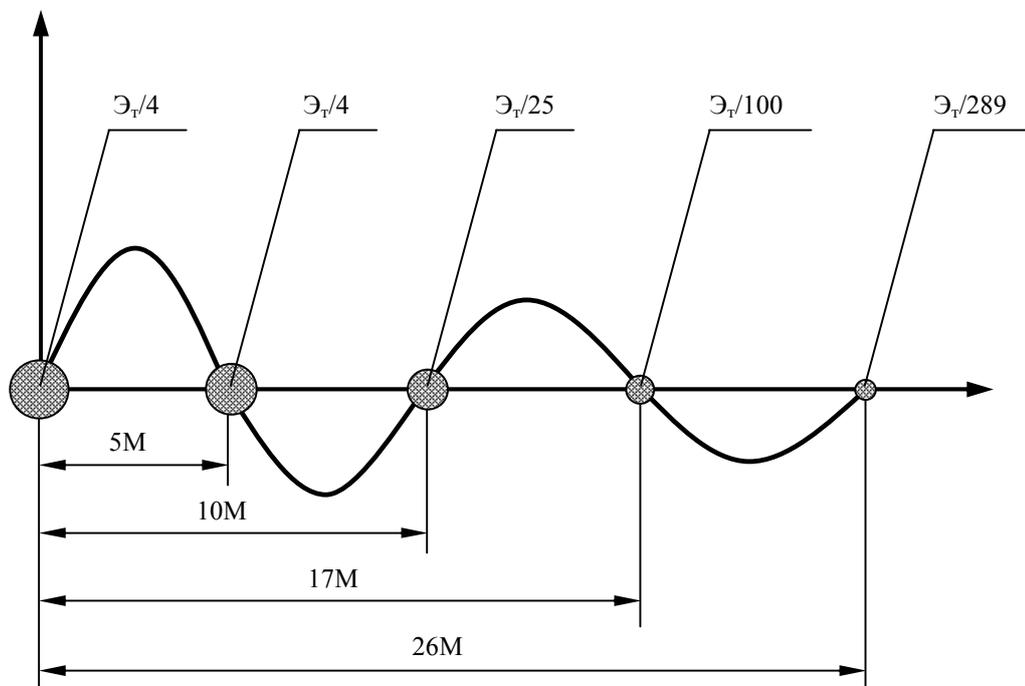


Рисунок 1 – Обобщенное пространство существования зон концентрации энергии

Рассмотрим применение полученных зависимостей для случая внедрения абразивной частицы в металлическую и резиновую поверхность.

Характеристика частицы:

размер $D = 0,004$ м, скорость $V = 10$ м/с, модуль упругости $E = 4,6 \times 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$, плотность $\rho = 2000$ кг/м³.

Характеристика металлической поверхности:

модуль упругости $E = 2,1 \times 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$,

Характеристика резиновой поверхности:

модуль упругости $E = 1,5 \times 10^6$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,5$.

Амплитудные нормальные напряжения на поверхности контура давления при внедрении частицы в поверхность определяются согласно [5]

$$\sigma_0 = 1,65 \cdot \rho^{\frac{1}{5}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^{\frac{4}{5}}} \cdot V_1^{\frac{2}{5}} \quad (17)$$

Расчеты по формулам (16, 17) показывает, что при внедрении частицы в металлическую поверхность радиус контакта составляет $r_1 = 1,6 \times 10^{-4}$ м, $\sigma_1 = 92,8$ МПа; а при внедрении частицы в резиновую поверхность соответственно: $r_2 = 0,0012$ м, $\sigma_2 = 0,33$ МПа.

Для случаев контакта частицы с металлической поверхностью (рис. 2) обобщенное пространство, выраженное в метриках, составляет:

8×10^{-4} м; $1,6 \times 10^{-3}$ м; $2,72 \times 10^{-3}$ м; $4,16 \times 10^{-3}$ м; $5,92 \times 10^{-3}$ м; 8×10^{-3} м,

а для случая контакта с резиновой поверхностью (рис. 3):

6×10^{-3} м; 12×10^{-3} м; $20,4 \times 10^{-3}$ м; $31,2 \times 10^{-3}$ м; $44,4 \times 10^{-3}$ м; 60×10^{-3} м.

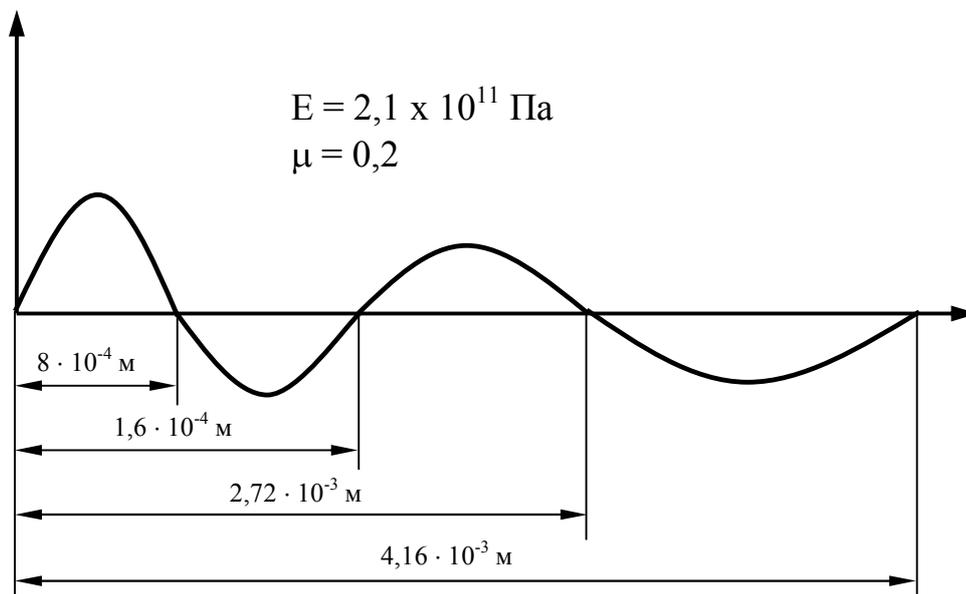


Рисунок 2 – Распространение поперечной волны при контакте частицы с металлической поверхностью

Таким образом, при контакте потока абразивных частиц с металлической поверхностью размер метрики M оказывается значительно меньшим, чем при контакте с резиновой поверхностью. Что касается распределения энергии по зонам, то оно идентично для обоих случаев.

Следствием этого является:

- плотность энергии, воспринимаемой единицей площади металлической поверхности при ударах потоком абразивных частиц существенно выше, чем для резиновой поверхности;

- в случае контакта потока частиц с металлической поверхностью велика вероятность совпадения зон контакта одних частиц с зонами концентрации энергии, возникающими при соударении с поверхностью других частиц (рис 4). В результате контактные напряжения могут превышать пределы прочности материала, даже в том случае, если контактные напряжения от падения каждой частицы ниже допустимых напряжений.

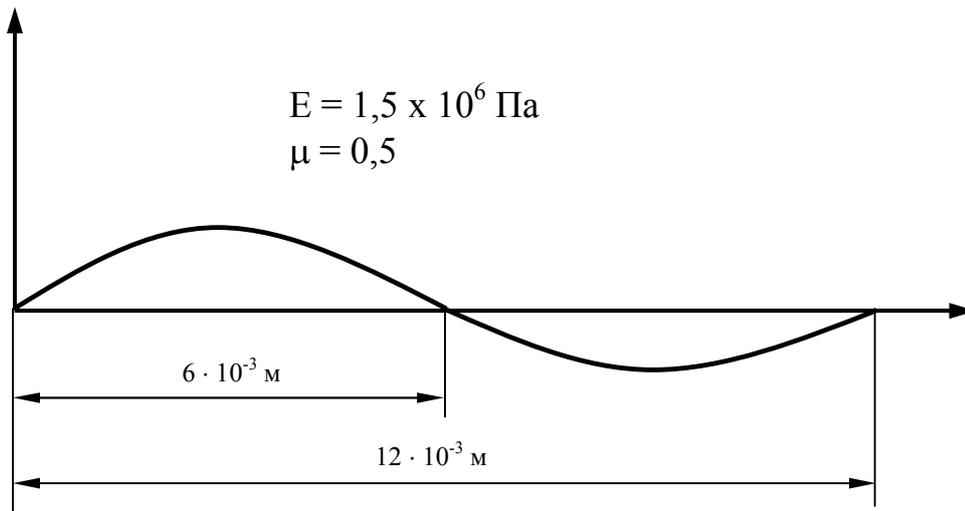


Рисунок 3 – Распространение поперечной волны при контакте частицы с резиновой поверхностью

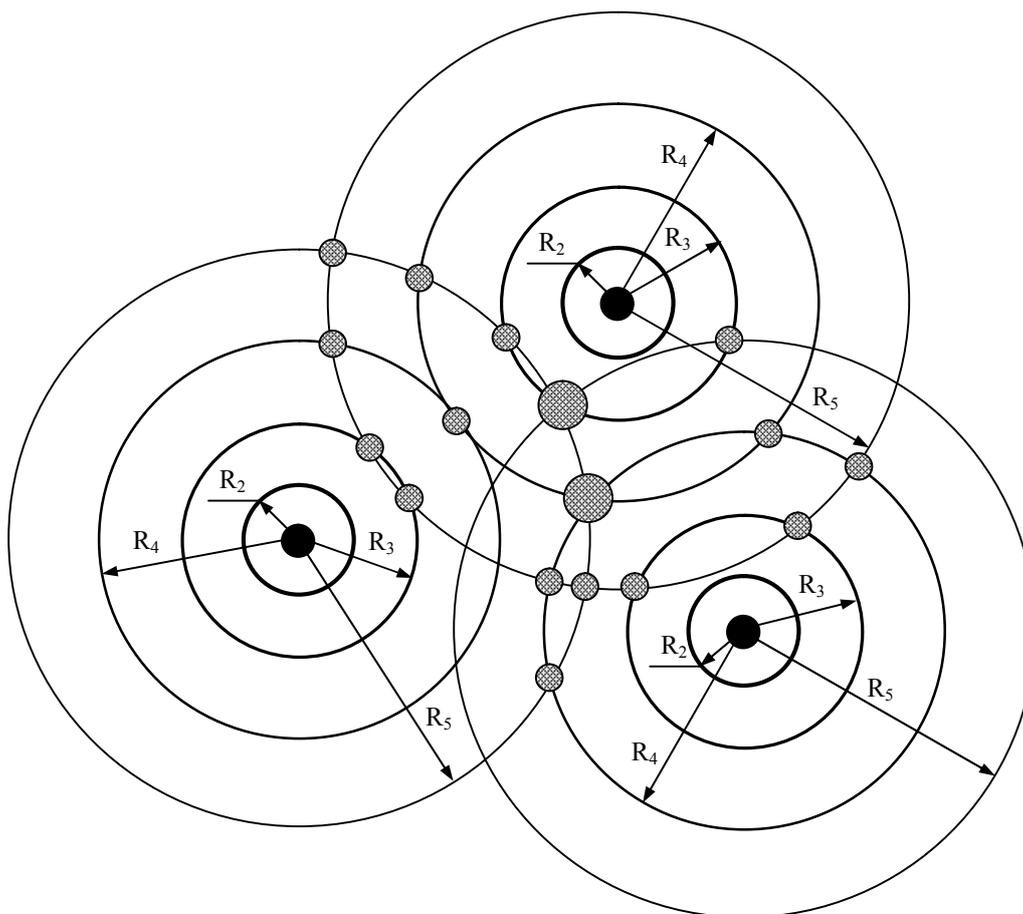


Рисунок 4 – Возникновение зон концентрации энергии при соударении частиц с металлической поверхностью

Предложенные теоретические положения могут быть положены в основу разработки методик определения размеров резиновых футеровочных элементов рабочих поверхностей измельчительного оборудования.

Список літератури

1. Защитные футеровки и покрытия горно-обогатительного оборудования / А.А. Тарасенко, Е.Ф. Чижик, А.А. Взоров, В.А. Настоящий. – М.: Недра, 1985. – 204 с.
2. Настоящий В.А., Тарасенко А.А., Маляров П.В., Чижик Е.Ф. Выбор параметров и разработка конструкций резиновых футеровок рудоразмольных мельниц // Тези доповідей Міжнародної конф. "Сучасні шляхи розвитку гірничого обладнання і технологій переробки мінеральної сировини". – Дніпропетровськ: НГАУ. – 1997. – С. 22.
3. Клочков В.Ф. Определение размеров зон разрушения при взрыве зарядов ВВ в горном массиве. Деп. в ГНТБ Украины N 972. Ук.93.
4. Джирма С.А., Настоящий В.А., Тарасенко А.А. К вопросу прогнозирования долговечности резиновых поверхностей измельчительного и транспортного оборудования работающих в условиях ударно-абразивного износа // Вібрації у техніці та технологіях. – 1998. – №3. – С. 68-69.
5. Пенкин Н.С. Гуммирование деталей машин. - М.: Машиностроение, 1977. - 200 с.

Розглянуто можливість теоретичного розрахунку гумових футерувальних плит на основі хвильової теорії удару.

It is considered the possibility of theoretical calculation of the rubber lining plates on the wave impact theory.