УДК 622.678

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОТКАНЕВОЙ ЛЕНТЫ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С УЧЕТОМ ЕЕ МАКРОПОВРЕЖДЕНИЙ ПРОБОЕМ

Татаринский А.В., магистрант,
Грудачев А.Я., канд. техн. наук, проф.,
Донецкий национальный технический университет

Разработана математическая модель напряженно - деформационного состояния резинотканевой ленты с учетом ее макроповреждений пробоем

It is developed the mathematical model of stain-damage state to bands with rubber and cloth for mines' conveyors using information about it's macrodamages by punching

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Лента является основным и наиболее дорогим, но наименее долговечным элементом ленточного конвейера. Стоимость ее составляет около половины общей стоимости конвейерной установки, а высокие амортизационные отчисления на ленту являются немаловажным фактором, определяющим область применения и экономическую эффективность конвейерного транспорта. Поэтому правильный выбор конструкции и характеристик ленты наряду с обеспечением надлежащих условий ее эксплуатации, с чем связано удлинение сроков службы ленты, имеет существенное значение.

Ориентировочный объем лент, выходящих из строя по причинам проколов и порывов ленты единичными ударами большой силы равняется 10%, поэтому изучение данного вопроса является актуальным, а исследование процессов напряженно-деформационного состояния резинотканевых лент при данном виде повреждений позволит снизить затраты, связанные с заменой ленты почти на 10% [1].

Анализ исследований и публикаций

Научные основы теории совершенствования конструкций и методов расчета резинотканевых лент посвящены исследования д.т.н.И.Г.Штокмана, к.т.н.В.Я. Барабанова, проф. В.С.Волотновского, проф.Е.Н.Высочина, В.А.Зуева, проф.Д.Ш.Монастырского, Г.В.Присязаного, к.т.н.Л.Н.Эппеля, П.В.Яковлева и многих других ученых, как в нашей стране, так и за рубежом. Данным вопросом занимаются организации такие как:Московская горная академия, Институт геотехнической механики, Запорожский национальный технический университет, Донецкий национальный технический университет, ООО «Горный институт» города Днепропетровск и т.д.

Все из вышеназванных ученых и организаций затрагивали вопросы разрушения конвейерных лент из-за накопления концентраций пробоев в них в процессе эксплуатации. Так, например, в работах проф. И.Г.Штокмана со всей полнотой исследовательский возможностей обоснованы процессы нарастания пробоев и причины вызвавшие таковые; в работах к.т.н. Л.И.Эппеля описаны процессы изнашивания рабочий, нерабочих прокладок, бортов резинотканевой ленты в процессе ее эксплуатации, что ведет к уменьшению сечения ленты по ее ширине; в работах к.т.н. В.Н.Потураева описаны процессы развития трещины в однородной и изотропной среде, но только на примере тонких пластинок из резины, что в полной мере не способно описать процесс развития трещины в резинотканевой ленте, в которой резина составляет определенный процент в структурной ее доле; в работах проф. Д.Ш.Монастырского описаны напряжения действующие в резинотканевых лентах в процессе их эксплуатации. В вышеуказанных работ не было с математической стороны описан процесс появления и развития трещин в резинотканевых лентах от повреждений таковых пробоем.

Постановка задачи

Для достижения вышеуказанной цели поставлены следующие основные задачи:

- разработка математической модели напряженно - деформированного состояния резинотканевой ленты шахтных конвейеров;
- анализ развития динамических процессов в резинотканевых лентах при их пробое;
- прогнозирование времени разрушения ленты в зависимости от формы пробоя, места его возникновения и цикла нагружения ленты.

Изложение материала и результаты

При решении задачи принимаем следующие допущения [2] (рисунок 1):

– рассматривается ткань как нелинейно упругий анизотропный материал, а резину – как линейно упругий изотропный элемент;

– считаем, что в случае плоской задачи компоненты тензора напряжений σ_{zz}, τ_{xz}, τ_{yz} и компоненты тензора деформацией ε_{zz}, γ_{xz}, γ_{yz} обращается в ноль.

– пренебрегая локальными эффектами, напряжения и деформации в ткани и резине принимаем постоянным по сечению и медленно меняющимися по длине;

– рассматриваем тканевый каркас как сплошное макроскопически однородное тело;

– эффектами, связанными с переплетениями ткани, пренебрегаем.

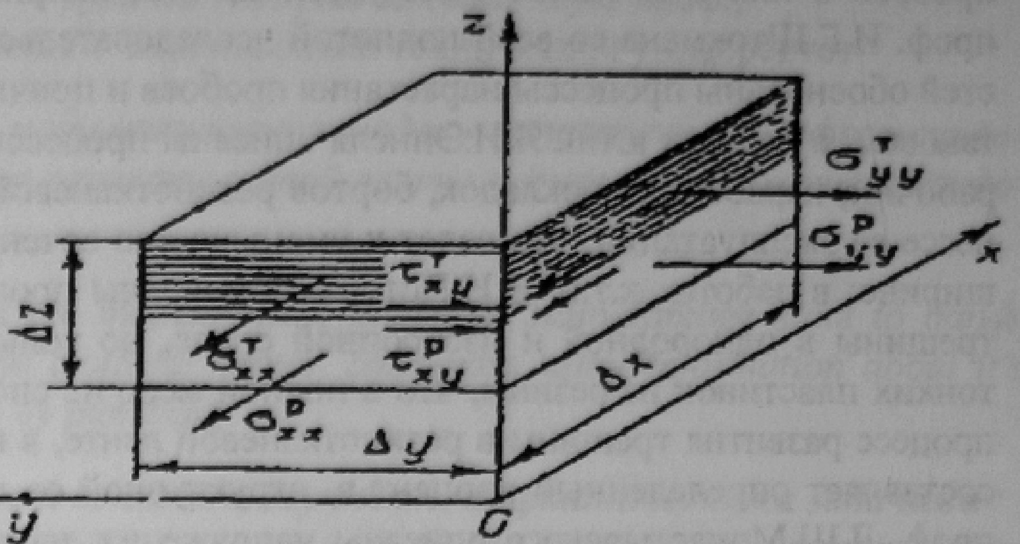

Рисунок 1 - Элемент прорезиненной прокладки с обозначением действующих напряжений на его поверхности

Напряжения в элементах конструкции конвейерных лент можно условно разделить на три вида: растяжения, изгиба и местных деформаций. Максимальные напряжения растяжения будут действовать в точке, где наблюдаются наибольшие нагрузки (статические, динамические или суммарные). Следуя общей теории армирования сред, снабдим параметры, относящиеся к ткани, индексом «т», а параметры, относящиеся к резине, индексом «р». Структурные напряжения в ткани обозначаться через $\sigma^{т}_{xx}$, $\sigma^{т}_{yy}$, $\tau^{т}_{yx}$, а макроструктурные деформации через $\varepsilon^{т}_{xx}$, $\gamma^{т}_{yy}$, $\gamma^{т}_{yx}$. Аналогичные компоненты для резины $\sigma^{р}_{xx}$, $\sigma^{р}_{yy}$, $\tau^{р}_{yx}$, $\varepsilon^{р}_{xx}$, $\gamma^{р}_{yy}$, $\gamma^{р}_{yx}$. Средние компоненты для слоя в целом обозначим σ_{xx}, σ_{yy}, τ_{yx}, ε_{xx}, γ_{yy}, γ_{yx}. Тогда средние напряжения в каркасе[2]

$$\sigma_{xx}=\psi\sigma^{т}_{xx}+(1-\psi)\sigma^{р}_{xx} \tag{1}$$

$$\sigma_{yy}=\psi\sigma^{т}_{yy}+(1-\psi)\sigma^{р}_{yy} \tag{2}$$

$$\tau_{yx}=\tau^{т}_{yx}=\tau^{р}_{yx}, \tag{3}$$

где $\text{ш}=\dfrac{f_t}{f_t+f_p}$ – коэффициент армирования;

f_t - площадь ткани в сечении $\Delta y\Delta z$;

f_p - площадь резины в том же сечении.

Эквивалентное растягивающее усилие в каркасе резинотканевой ленты можно найти как

$$\sigma_{экв}=\sqrt{\sigma^2{}_{xx}+\sigma^2{}_{yy}}, H. \tag{4}$$

В общем случае сдвиговые усилия определяются по формуле

$$\tau=\gamma_{max}\cdot G_{xy}, H, \tag{5}$$

где G_{xy}=(8-10) Н/мм·прокл – для всех резинотканевых лент [3];

Е - модуль Юнга, $\frac{H}{мм^2}$.

Максимальное сдвиговое усилие при огибании лентой барабана также могут находится по формуле [2]

$$\gamma_{max}=\frac{0,37\cdot\delta\cdot B\cdot i}{Д_б}\sqrt{\frac{E\cdot c}{G_{xy}}}, \tag{6}$$

где i- количество прокладок ленты;

С - суммарная толщина тканевой прокладки и сквиджа в общей толщине ленты,мм.

Тогда зная τ и по (5), для определенной ленты и конвейера, а также найдя растягивающие усилия по (4) и (6), находим эквивалентное напряжение, действующее в ленте, по формуле

$$\sigma^{лент}_{экв}=\sqrt{\sigma^2{}_{экв}+4(G_{xy}\cdot\gamma_{max})^2}, \tag{7}$$

где $\sigma_{экв}$ – находится используя выражение (4) или принимается по критической прочности ленты

$$\sigma_{экв}=\sigma_{пр}=B*i*p/m,$$

где В – ширина ленты, мм;

р – разрывные усилия 1 см ширины прокладки, кН/мм;

m – коэффициент запаса прочности ленты.

Подставляя (6) в (7) получаем эквивалентное напряжение в резинотканевой ленте при прохождении ее через барабан

$$\sigma^{лент}_{экв}=\sqrt{(\frac{B\cdot i\cdot p}{m})^2+4(G_{xy}\cdot\frac{0,37\cdot B\cdot\delta\cdot i}{Д_б})^2\cdot\frac{E\cdot c}{G_{xy}}} \tag{8}$$

$$=\sqrt{(\frac{B\cdot i\cdot p}{m})^2+4E\cdot c\cdot G_{xy}(\frac{0,37\cdot i\cdot B\cdot\delta}{Д_б})^2}, H$$

Общее время разрушения образцов резинотканевой ленты τ:

$$\tau=\tau_0+\tau_1+\tau_2 \tag{9}$$

где τ_0 – время, необходимое для формирования трещины;

τ_1 – медленная стадия развития трещины;

τ_2 – быстрая стадия развития трещины.

Долговечность резинотканевых ленты можно представить в виде:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \int_0^1 \frac{dl}{V_0 e^{\beta l}} + \int_{1-}^{1} \frac{dl}{1} = \frac{1}{V_0 \beta}(1 - e^{-\beta l}) + \frac{1 - l_{ш}}{c}, \text{с.} \qquad (10)$$

В общем случае долговечность образцов может быть выражена соотношением:

$$\tau = be^{-B\sigma}, \text{с}, \qquad (11)$$

где b и B - постоянные, зависящие от материала;

σ – напряжения в образце.

Используя теорию Маккеавели [3], конец трещины в материале имеет характерный фиктивный радиус и можно подсчитать напряжение $\sigma_0^{тр}$ около вершины трещины по формуле:

$$\sigma_0^{тр} = \sigma_н (1 + 2\sqrt{\frac{C_{тр}}{J}}), H, \qquad (12)$$

где $C_{тр}$ – длина трещины, см; мм.

$\sigma_н = \sigma_{экв}$ – начальное напряжение в образце, на момент появления трещины, кН.

Используя формулу (12) и (8) можно получить математическую модель напряженно-деформационного состояния резинотканевых лент на барабане

$$\sigma_0^{тр} = \sqrt{(\frac{B \cdot i \cdot p}{m})^2 + 4E \cdot c \cdot G_{xy} (\frac{0{,}37 \cdot i}{Д_т})^2} \cdot (1 + 2\sqrt{\frac{C_{тр}}{J}}), \qquad (13)$$

Время распространения трещины в образце при этом:

$$t = \left| (\frac{\beta}{v_0}) \cdot (L_{тр} - L_0) \cdot e^{-\beta(L_{тр} - L_0)} \right|, \text{с}, \qquad (14)$$

где L_0 – начальная длина трещины.

В резинотканевых лентах могут образовываться трещины, не опасные для нее, т.к. напряжение около их радиусов распространения не превышает разрывного усилия ленты. Трещина не опасна, если

$$у_о^{тр} < B \cdot i \cdot p, \text{кН}$$

$$у_о^{тр} \le [\sigma_p].$$

Так как трещина в резинотканевой ленте распространяется в две стороны от условно взятой середина ее образования, тогда математическая модель для напряжения и времени распространения трещины в две стороны для ленты на прямолинейном участке движения вблизи набегания ее на барабан, т.е без учета сдвигающих усилий, можно представить в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{(1)n} = K_{конц} \dfrac{\beta - \sum\limits_{i=1}^{n-1} \mathrm{L}_{(1,2)\text{тр}}}{m} \cdot i \cdot p(1+2\sqrt{\dfrac{L_{(1)\text{тр}}}{J_n}}), \text{кН} \\ \sigma_{(2)n} = K_{конц} \dfrac{\beta - \sum\limits_{i=1}^{n-1} \mathrm{L}_{(1,2)\text{тр}}}{m} \cdot i \cdot p(1+2\sqrt{\dfrac{L_{(2)\text{тр}}}{J_n}}), \text{кН} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} t_{(1)n} = \left| (\dfrac{\beta}{v_0}) \cdot (\mathrm{L}_{(1)\text{тр}} - \mathrm{L}_{(1)0}) \cdot e^{-\beta(\mathrm{L}_{(1)} - \mathrm{L}_{(1)0})} \right|, \text{с} \\ t_{(2)n} = \left| (\dfrac{\beta}{v_0}) \cdot (\mathrm{L}_{(2)\text{тр}} - \mathrm{L}_{(2)0}) \cdot e^{-\beta(\mathrm{L}_{(2)} - \mathrm{L}_{(2)0})} \right|, \text{с} \end{cases} \quad (16)$$

В ленте в одном поперечном сечении может располагаться несколько пробоев, тогда напряжение в ленте относительно n-го пробоя:

$$\sigma_n = K_{конц} \cdot \frac{\beta - \sum\limits_{i=1}^{n-1} \mathrm{L}_{\text{тр}n}}{m} \cdot i \cdot p(1+2\sqrt{\frac{L_{n\text{тр}}}{J_n}}), \text{кН} \quad (17)$$

при этом разрыве усилие в ленте:

$$\left[\sigma_p\right] = \frac{B \cdot i \cdot p \cdot \dfrac{B - \sum\limits_{i=1}^{n} L_{\text{тр}n}}{B}}{K_{конц}}, \text{кН} \quad (8)$$

где $\sum\limits_{i=1}^{n} L_{трn}$ - сумма длин трещин по ширине ленты в одном направлении распространения;

n – число пробоев в одном направлении ширины ленты;

$\sum\limits_{i=1}^{n-1} L_{трn}$ сума длин трещин по ширине ленты в одном направлении, за вычетом той трещины, напряжение около окружности, которой определяется;

$K_{конц}$ - коэффициент концентраций напряжения около трещины.

Представим график изменения напряжений в ленте ТК-100 на прямолинейном участке при числе прокладок 4 и 8, для J=0,5см (рисунок 1)

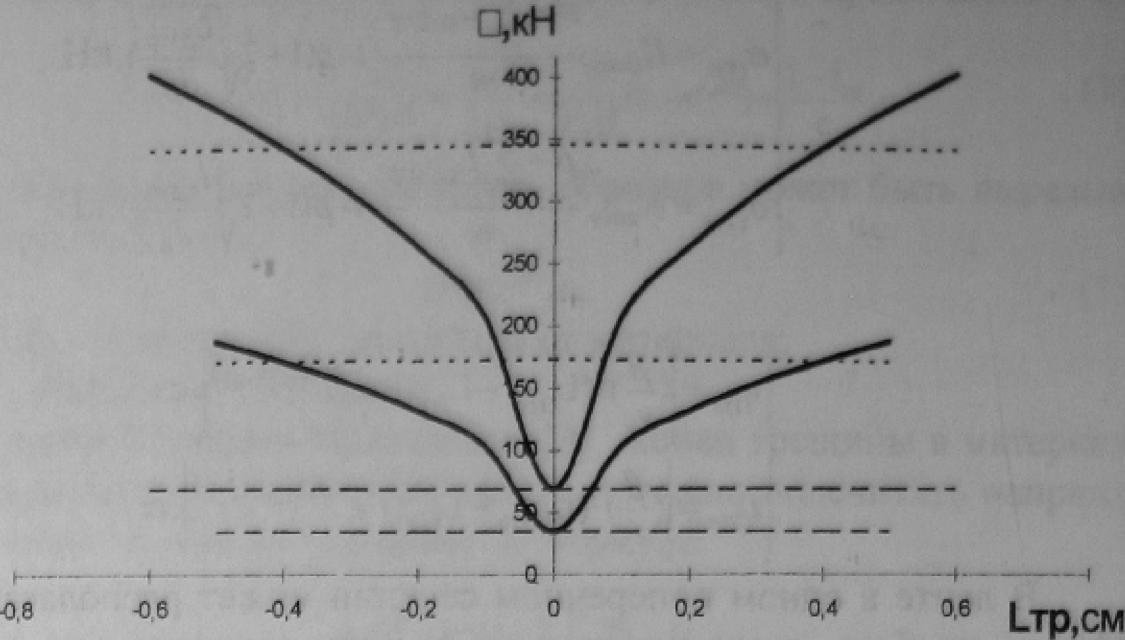

Рисунок 1 - Изменение напряжения в резинотканевой ленте ТК-100 относительно длины распространения трещины в ней при J=0,5см

Выводы и направление дальнейших исследований

Основными результатами данной работы являются:

1) вывод основной математической зависимости изменения напряжения в резинотканевых лентах при их повреждении пробоем, а также время, которое требуется для полного разрушения ленты при пробое. Данные зависимости имеют вид экспоненты, которая показывает распространение напряжения и времени распространения трещины в ленты в результате пробоя в функции от длины данной трещины в ленте;
2) исследование ленты ТК-200, ТК-100 и расчет критической величины трещины в ней. Установлено, что при пробое ленты в сквозную диаметром окружности пробоя равной 0,1см- критическая величина трещины равняется 0,8см, а при диаметре окружности пробоя равной 0,5см- соответственно 4см.

Список источников.

1. Шахмейстер Л.Г., Солод Г.И. Подземные конвейерные установки.- "Недра", М., 1976,с.431
2. Монастырский Д.Ш. Механика процессов сборки резинотканевых конвейерных лент- Л.,1989,с.105
3. Кожушко Г.Г. Механика деформации и прогнозирования ресурса резинотканевых лент конвейеров горно-рудных предприятий- Д.,1992, с.34