

В.А. Ропай, Д.Л. Колосов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ
В ДВУХСЛОЙНОЙ РЕЗИНОТРОСОВОЙ
ТРАНСПОРТЕРНОЙ ЛЕНТЕ ПРИ РАЗРУШЕНИИ
ОТДЕЛЬНЫХ ТРОСОВ**

процессе эксплуатации конвейеров наблюдается разрушение ленты и ее тросовой основы. Разрушение (разрыв непрерывности) тросов (рис. 1) вызывает перераспределение усилий в тросах и снижение агрегатной прочности ленты. Отдельные тросы оказываются более нагруженными, возникают значительные деформации в резиновой матрице, что также ведет к уменьшению агрегатной прочности ленты. В настоящей работе исследуется влияние вышеперечисленных факторов на распределение усилий в

тросах ленты и на ее прочность.

Принятые обозначения размеров в поперечном сечении РТЛ показаны на рис. 2.

Дифференциальные уравнения напряженно-деформированного состояния (НДС) двухслойной резиNOTросовой ленты (РТЛ) с порывами отдельных тросов запишем в виде [1]:

$$\frac{d^2 u_{11}}{dx^2} + \alpha \left[-u_{11} \left(1 + \frac{1}{n_3}\right) + u_{12} + u_{21} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{21}}{dx^2} + \alpha \left[-u_{21} \left(1 + \frac{1}{n_3}\right) + u_{22} + u_{11} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{12}}{dx^2} + \alpha \left[u_{11} - u_{12} \left(1 + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3}\right) + u_{13} \frac{1}{n_2} + u_{22} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{22}}{dx^2} + \alpha \left[u_{21} - u_{22} \left(1 + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3}\right) + u_{23} \frac{1}{n_2} + u_{12} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{13}}{dx^2} + \alpha \left[u_{12} \frac{1}{n_2} - u_{13} \left(1 + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3}\right) + u_{14} + u_{23} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{23}}{dx^2} + \alpha \left[u_{22} \frac{1}{n_2} - u_{23} \left(1 + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3}\right) + u_{24} + u_{13} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{1i}}{dx^2} + \alpha \left[u_{1,i-1} n^* - u_{1i} \left(1 + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3}\right) + u_{1,i+1} n^{**} + u_{2i} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{2i}}{dx^2} + \alpha \left[u_{2,i-1} n^* - u_{2i} \left(1 + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3}\right) + u_{2,i+1} n^{**} + u_{1i} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{1n}}{dx^2} + \alpha \left[u_{1,n-1} - u_{1n} \left(1 + \frac{1}{n_3}\right) + u_{2n} \frac{1}{n_3} \right] = 0;$$

$$\frac{d^2 u_{2n}}{dx^2} + \alpha \left[u_{2,n-1} - u_{2n} \left(1 + \frac{1}{n_3}\right) + u_{1n} \frac{1}{n_3} \right] = 0.$$

где u_{1i} , u_{2i} – продольные перемещения сечения x i -х тросов первого и второго рядов; n – число армирующих тросов;

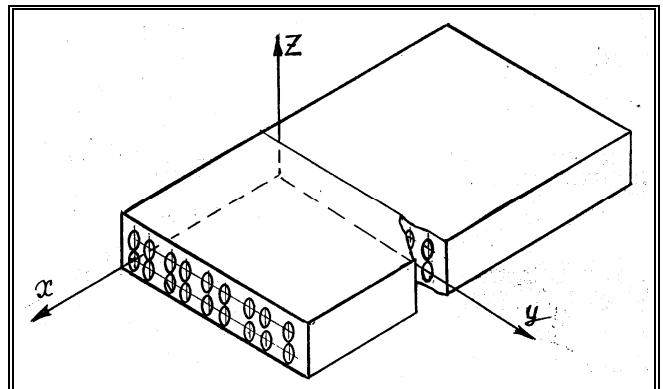
$\alpha = \frac{G\delta}{Ah_1}$; $n_2 = \frac{h_2}{h_1}$; $n_3 = \frac{h_3}{h_1}$; G – модуль упругости резины

при сдвиге; $\delta = 0,5\pi d$; d – диаметр тросов; h_1 , h_2 – расстояния между тросами; h_3 – расстояние между тросами

первого и второго слоев; A – жесткость троса при растяжении; при i нечетном $n^* = \frac{1}{n_2}$, $n^{**} = 1$, при i четном $n^* = 1$,

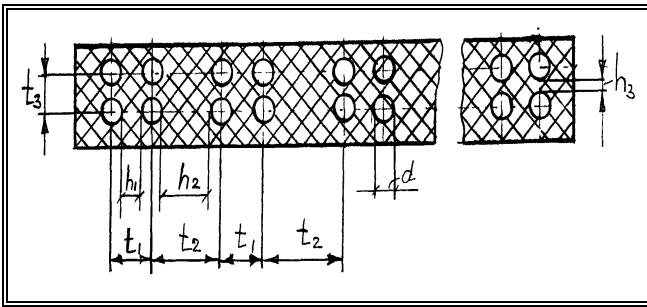
$n^{**} = \frac{1}{n_2}$.

Решение полученной системы линейных дифференциальных уравнений 2^{го} порядка (1), описывающих напряжен-



В

Рис. 1. Отрезок РТЛ с дефектом тросовой основы



но-деформированное состояние тросовой основы будем осуществлять численными методами. Большинство стандартных программ для решения дифференциальных уравнений требуют разрешения всех уравнений системы относительно старшей производной и перехода к системе дифференциальных уравнений первого порядка. Приняв $v_{ij} = \frac{du_{ij}}{dx}$ ($i=1,2; j=1,2,\dots,n$), получим систему из $2n$ дифференциальных уравнений первого порядка.

Граничные условия могут быть сформулированы в следующем виде:

в сечении ленты с дефектом ($x=0$) перемещения целых тросов равны нулю $u_{ij}(0) = 0$, первая производная от соответствующих перемещений $u'_{ij} = \frac{P_{ij}(x)}{EF}$ пропорциональна

усилию в тросе. Эти значения не могут быть определены заранее. Однако, можно задать граничные условия в каком-либо другом сечении ($x=l$). Рассмотрим жесткое закрепление края ленты (рис. 3). В рассматриваемом сечении ($x=l$) все перемещения тросов равны между собой $u_{ij}(l) = u$, кроме того, как показано в работах [2, 3], усилия в тросах постепенно выравниваются, стремясь к среднему значению усилия P_{CP} :

$$\text{при } x \rightarrow \infty, P_i(x) \rightarrow P_{CP}.$$

Однако, как показывают исследования [2], в сечении $x > 5-6$ м, усилия в тросах практически равны средним: $P_i(x) \approx P_{CP}$ при $x > 5-6$ м.

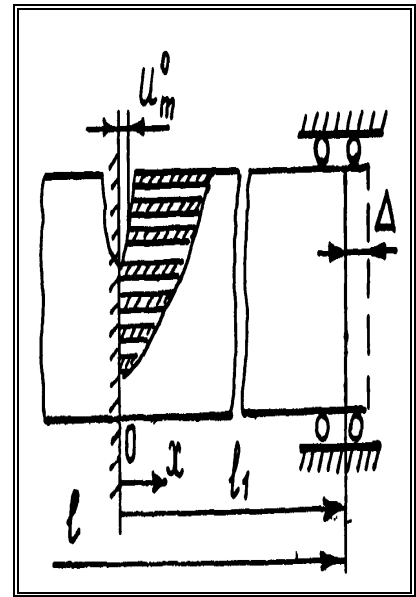
Достаточно апробированным численным методом решения систем дифференциальных уравнений является метод Рунге-Кутты. Однако его применение требует представления решаемых уравнений в форме Коши, то есть нам необходимо знать значение первых производных от соответствующих перемещений тросов, чего мы заранее определить не можем.

Математический пакет MathCAD 2000 Pro [4] позволяет по граничным условиям найти начальные условия использованием функции **sbval**. Это метод последовательных приближений для решения по разностной схеме краевой задачи. Функция **sbval** не решает краевую задачу, а только находит недостающие значения на краю отрезка. После этого краевая задача переходит в задачу с начальными условиями (задача Коши), которая и решается.

Таким образом, решение данной системы распалось на решение двух подзадач:

Рис. 2. Поперечное сечение двухслойной РТЛ

Рис. 3. Жесткая схема закрепления образцов РТЛ на испытательной машине



- использовани-ем функции **sbval** для определения начальных условий и тем самым сведением задачи к задаче Коши;

- использовани-ем функции **rkfixed** для решения мы альных уравнений.

Исследовалось напряженное состояние двухслойной резиновой ленты, состоящей из 16 одинаковых тросов при различных случаях повреждений. Расчеты производились при следующих параметрах ленты: модуль сдвига резины $G = 10^6$ Па; модуль упругости стали $E = 1,5 \cdot 10^{11}$ Па; диаметр троса $d = 4,3$ мм; продольная жесткость троса $A = EF = E \cdot 0,8 \frac{\pi d^2}{4} = 1,743 \cdot 10^6$ Н.

При вычислениях варьировали параметрами h_1, h_2, h_3 , определяющих расположение тросов в ленте. Сравнивались два случая:

1. Тросы в ленте расположены таким образом, что в пучке 2 троса (верхний и нижний). При этом шаг укладки тросов принимался постоянным $h_1 = h_2$;
2. Тросы располагались пучками (по четыре троса в пучке) $h_1 \neq h_2$ (рис. 2).

Для характеристики напряженного состояния тросов введем безразмерный коэффициент концентрации усилий $k_i(x)$, равный отношению усилия в данном тросе $P_i(x)$ к среднему усилию P_{CP} , приходящемуся на каждый трос ленты без дефектов

$$P_{CP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i(x).$$

Результатом численного решения являлись графические зависимости изменений усилий в тросах по длине ленты.

Моделировались следующие случаи повреждения ленты:

1. Поврежден крайний трос.

Диаграммы на рис. 4, 5 характеризуют распределение усилий в тросах в сечении, где произошло повреждение тросовой основы. Рис. 4а соответствует

вует случаю, когда в пучок объединены 2 троса ($h_1 = h_2 = 10$ мм), рис. 4б соответствует случаю, когда в пучок объединены 4 троса ($h_1 = 2$ мм, $h_2 = 10$ мм, $h_3 = 2$ мм).

Значения h_1, h_2, h_3 выбраны из следующих технических и технологических соотношений. Технологически невозможно выполнить вулканизацию тросов таким образом, чтобы расстояние между соседними тросами было менее 2 мм. Поэтому это значение являлось нижней границей при выборе значений h_1, h_2, h_3 . При реализации одноступенчатого стыка (который является наиболее предпочтительным по технологии изготовления и по разрывному усилию соответствует более 80% от прочности ленты) расстояние между пучками должно быть на 3-4 мм больше ширины пучка, т.е. при укладке тросов

по первой схеме $h_1 = h_2 \geq d + 3 \div 4$ мм, $h_1 \geq 2$ мм, $h_2 \geq 2d + 5 \div 6$ мм.

2. Поврежден не крайний трос.

Градиент напряжений при таком порыве меньше, чем при порыве крайнего троса. Наиболее перегружены оказываются ближайшие 3 троса.

3. Повреждены два (четыре) крайних троса.

Диаграммы при повреждении четырех крайних тросов приведены на рис. 5.

Сравнительный анализ показывает, что больше всего

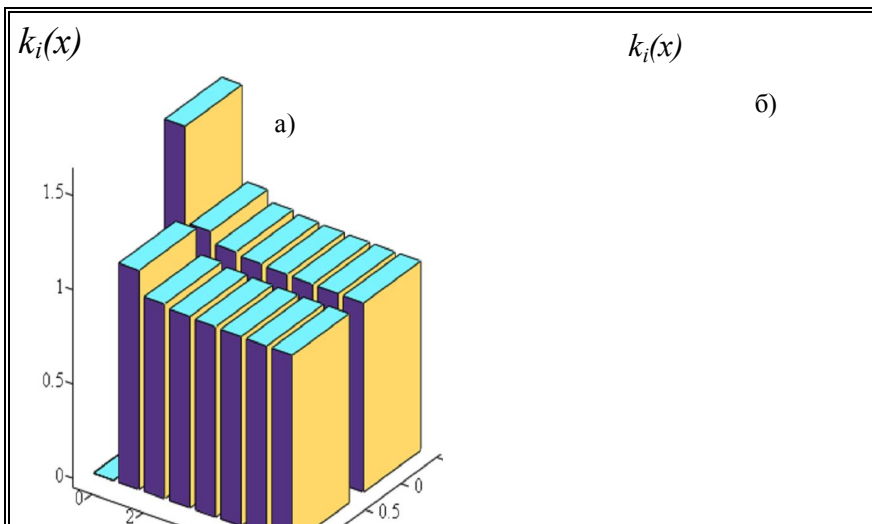


Рис. 4. Диаграмма распределения усилий в тросах ленты при повреждении одного крайнего троса: а – ($h_1=h_2=10$ мм, $h_3=2$ мм); б – ($h_1=h_3=2$ мм, $h_2=10$ мм)

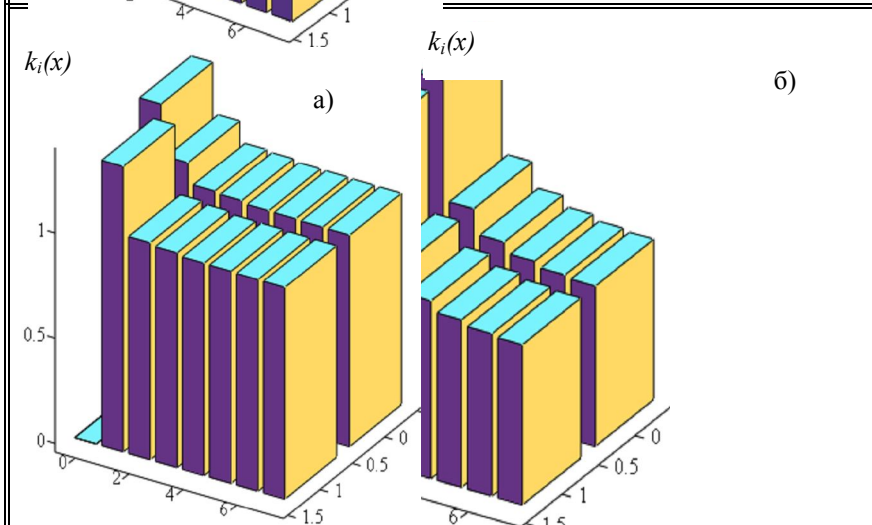


Рис. 4

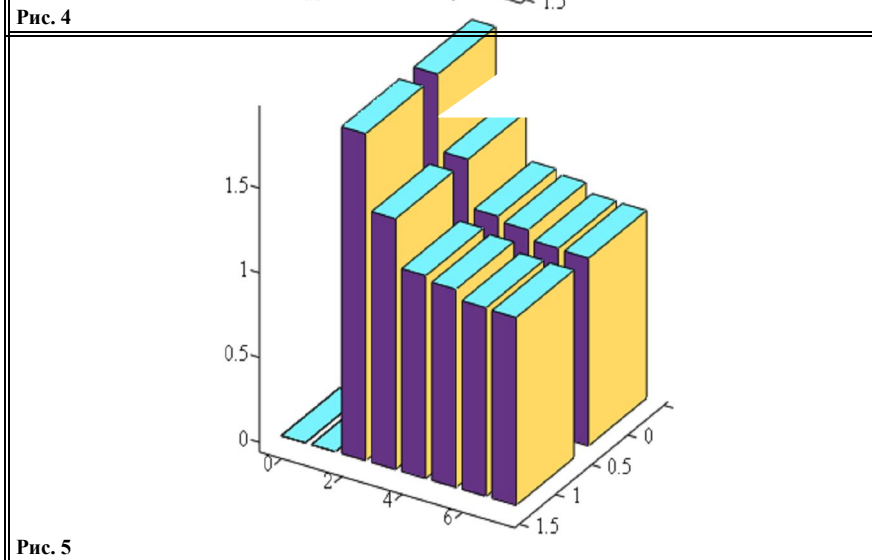


Рис. 5

Рис. 5. Диаграмма распределения усилий в тросах ленты при повреждении пучка из четырех крайних тросов: а – ($h_1=h_2=10$ мм, $h_3=2$ мм); б – ($h_1=h_3=2$ мм, $h_2=10$ мм)

оказываются перегружены тросы, соседние с оборванным; перегрузка остальных тросов значительно меньше и снижается пропорционально удалению от поврежденного участка, независимо от того, в каком слое расположен поврежденный трос. По мере удаления от сечения, усилия в тросах выравниваются, стремясь к среднему значению P_{CP} .

Сравнение диаграмм, описывающих нагружение тросов при разных схемах укладки тросов показывает, что зона повреждения по схеме 1 ($h_1=h_2$) характеризуется большим градиентом напряжений, чем по схеме 2 ($h_1 \neq h_2$). Это обусловлено тем, что ближайший к поврежденному трос в одном слое, воспринимает незначительную нагрузку.

При порывах тросов, усилия в них и максимальные касательные напряжения затухают на незначительных длинах (до 4 м) при различных случаях повреждений. Наиболее опасен случай повреждения нескольких соседних тросов (пучок) в одном сечении ленты. При этом максимально перегруженными ($k_i(x) > 2$) оказываются тросы, соседние с поврежденными. Следовательно, при повреждении одного троса, предпочтительным является укладка тросов по 4 в каждом пучке, с минимально осуществимым технологическим расстоянием между тросами (рис. 2).

**СПИСОК
ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Ропай В.А., Колосов Д.Л.* Математическая модель напряженно-деформированного состояния двухслойной резинотросовой ленты с порывами отдельных тросов // Научный Вестник НГА Украины. – Днепропетровск. – 2001. – №1. – С. 50-53.

2. *Колосов Л.В., Обухов А.Н., Ропай В.А.* Исследование напряженно-деформированного состояния резинотросовых лент при повреждении тросовой основы // Изв. вузов. Горный журнал. – 1980. – №1. – С. 48–53.

3. *Жупиев А.Л., Колосов Л.В.* Распределение усилий в тросах резинотросовой ленты при повреждении тросовой основы // Изв. вузов. Горный журнал. – 1983. – №12. – С. 54–58.

4. *Херхагер М., Партоль Х.* Mathcad 2000. Справочное пособие. Киев.: «Ирина», ВНУ, 2000. — 416 с.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ропай В.А., Колосов Д.Л. — Московский государственный горный университет.