УДК 519.713; 519.711:53; 678.4:658.567

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН ПРИ ИХ УТИЛИЗАЦИИ

Лучин И.В., Кравченко И.Н., Конкин М.Ю., Золотов И.А.
ФГБВОУ ВПО «Военно-технический университет», Балашиха,
e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

В настоящее время в нашей стране и за рубежом выпускается большое количество автомобильных шин различных модификаций с металлокордом в каркасе и брекере, причем, в зависимости от назначения шин слойность их металлокордного брекера, его размеры по ширине, тип металлокорда в брекере и каркасе могут быть самыми разными. Поэтому и энергосиловые характеристики процесса измельчения разных шин будут разные. В связи с этим возникает необходимость разработки теоретических методов расчета этих характеристик, поскольку организация и проведение экспериментальных методов их определения требуют больших затрат времени и труда, а ассортимент выпускаемых шин непрерывно расширяется.

Ключевые слова: автомобильные шины, моделирование, утилизация, процесс разрезания, переработка, измельчение

SIMULATION OF THE RECYCLING PROCESS OF USED TIRES AT THEIR DISPOSAL

Lucin I.V., Kravchenko I.N., Konkin M.Y., Zolotov I.A.
Military-Technical University, Balashikha,
e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Currently in our country and abroad produced a large number of different versions of tires with metal in the carcass and breaker, and, depending on the purpose of their metal cord tires Ply belt, its width dimensions, type of steel cord belt, and frame can be very different. Therefore, the energy-power characteristics of different tires grinding process will be different. In this connection there is the need to develop theoretical methods of calculating these characteristics, as the organization and conduct of experimental methods for their determination are time-consuming and labor, and the assortment of tires continuously expanding.

Keywords: car tires, modeling, utilization, cutting process, processing, grinding

Наиболее сложным процессом предварительной переработки изношенных металлокордных автомобильных шин является разрезание протекторных браслетов (брекерных слоев), так как они содержат наибольшее количество металлокордных слоев [1, 5]. Схема разрезания протекторных браслетов показана на рис. 1.

В общем случае в состав протекторных браслетов входят наружный резиновый массив, защитный (экранирующий) слой текстильного обрезиненного корда, несколько брекерных слоев обрезиненного металлокорда, слой каркаса из обрезиненного металлокорда и внутренний резиновый слой (гермослой). Боковины металлокордных шин обычно состоят из одного слоя обрезиненного металлокорда и резинового массива [3, 4].

Бортовые части грузовых шин (вблизи бортовых колец) в общем случае содержат два слоя каркасного обрезиненного металлокорда (с учетом его заворота вокруг бортового кольца), резиновый наполнительный шнур, бортовую ленту из обрезиненного металлокорда, наружный резиновый массив. Из сказанного следует, что наиболее трудоемким для разрезания являются протекторные браслеты, поскольку в нем содержание металлокорда наибольшее [2]. Поэтому целесообразно для него в первую очередь провести исследование процесса предварительного разрезания.

Учесть в полном объеме влияние всех разрезаемых слоев брекера (протекторных браслетов) на общее усилие разрезания достаточно сложно. Для этого необходимо знать, например, удельные силы разрезания различных каркасных, брекерных и протекторных резин, прочность связи различных резин с разными кордными нитями и некоторые другие факторы (например, температуру и предысторию изношенной шины) и их влияние на усилие разрезания [5]. Поэтому при разработке математической модели процесса переработки резинокордных систем необходимо выделить главные (основные) факторы, влияющие на общее усилие разрезания.

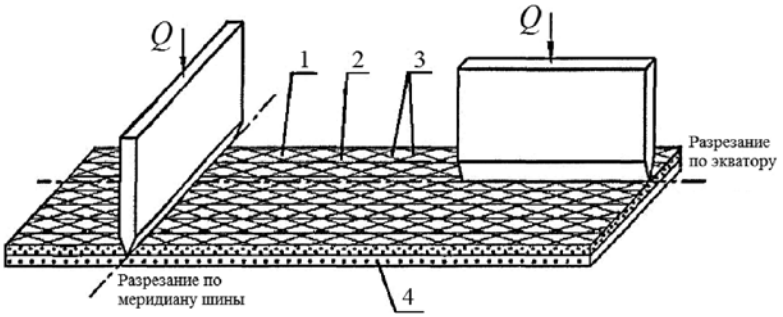

Рис. 1. Схема разрезания протекторных браслетов:
1 – слой протекторной резины; 2 – защитный слой обрезиненного текстильного корда; 3 – слои резины, армированной металлическим кордом (обрезиненный металлокордный брекер); 4 – слой каркасной резины, армированной металлическим кордом (каркасный обрезиненный металлокорд)

Составим с учетом влияния на величину общего усилия разрезания слоев текстильного и металлического корда расчетную схему процесса разрезания одного слоя корда протекторного браслета клинообразным ножом, причем разрез будем осуществлять вдоль меридиана, то есть поперек брекера (рис. 2).

Рассмотрим участок ширины *l*. Нить корда расположена под углом α к режущей кромке ножа *ML*. Угол заточки лезвия ножа составляет величину $\beta_н$.

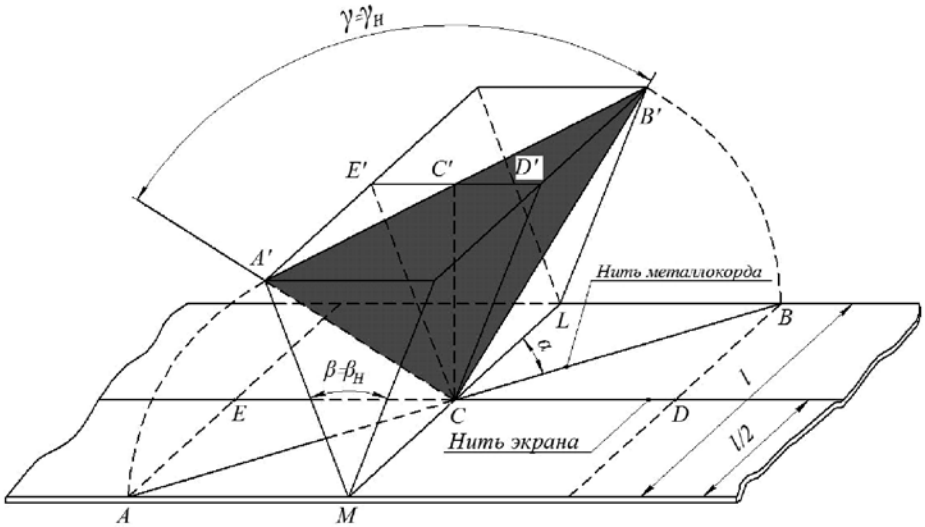

Рис. 2. Схема разрезания слоя металлокордного брекера:
l – ширина слоя, ML – режущая кромка ножа, α – угол расположения нити корда к режущей кромке ножа, β – угол перегиба слоя, $\beta_н$ – угол заточки лезвия ножа; γ – угол перегиба нити; $\gamma_н$ – угол заточки ножа в плоскости A'CB' нити

Рассматриваемый механизм процесса разрезания следующий: при внедрении клинообразного ножа в протекторный браслет в процессе взаимодействия ножа и слоя обрезиненного металлокорда последний будет перегибаться относительно кромки ножа *ML*. Допустим, что ширина слоя *l* при перегибе не изменяется (*l* = const). Тогда нити корда рассматриваемого слоя, в том числе нить AB, после перегиба (на малом расстоянии от кромки ножа) в предельном случае будут прилегать к боковым граням лезвия ножа (прямые CB' и CA'). Точки A и B займут положение A'B' соответственно. При этом угол перегиба нити γ (угол между линиями CA' и CB') будет наименьшим из возможных (равным углу заточки ножа $\gamma_н$ в плоскости нити A'CB'), а угол перегиба слоя β будет равен углу заточки ножа $\beta_н$. В этом предельном случае (рис. 3) усилие сопротивления рассматриваемой кордной нити внедрению ножа в протекторный браслет

$Q_{1н}$ будет наибольшим, согласно уравнению равновесия системы «нож – кордная нить»:

$$Q_{1н} = 2\,N_{1н}\cos\frac{\gamma}{2}, \qquad (1)$$

где $N_{1н}$ – усилие растяжения одной нити корда слоя.

Из геометрических построений (см. рис. 2) следует

$$\cos\frac{\gamma}{2} = \sin\alpha\cos\frac{\beta}{2}. \qquad (2)$$

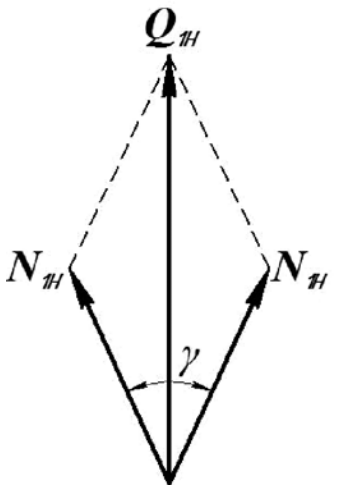

Рис. 3. Усилие сопротивления кордной нити внедрению ножа:
$Q_{1н}$ – усилие сопротивления рассматриваемой кордной нити внедрению ножа; $N_{1н}$ – усилие растяжения одной нити корда слоя; γ – угол перегиба нити

Используя зависимости (1) и (2), получим выражение для расчета усилия Q сопротивления всех нитей слоя внедрению ножа в металлокордный брекер

$$Q = 2nN_{1н}\sin\alpha\cos\frac{\beta}{2}, \qquad (3)$$

где $n = lI\sin\alpha$ – число нитей слоя корда, пересекаемых линией разрезания; l – длина линии разреза слоя (ширина слоя брекера); I – частота нитей корда в слое, шт./длину.

Если величина усилия натяжения кордных нитей $N_{1н}$ (см. рис. 3) достигает своего предельного значения ($N_{1н} = N_{1пред}$), то произойдет разрыв всех нитей и рассечение данного слоя. В этом случае усилие прорезания слоя Q_p определим из уравнения

$$Q_p = 2lIN_{1пред}\sin^2\alpha\cos\frac{\beta}{2}. \qquad (4)$$

Необходимо отметить, что $N_{1н}$ может достигнуть своего предельного значения $N_{1пред}$ раньше, чем нить коснется боковых поверхностей лезвия ножа, то есть при фактическом значении угла β большем, чем $\beta_н$. Фактическая величина угла перегиба слоя корда β может находиться в пределах $\beta_н < \beta < 180°$. При этом, как видим из уравнения (4), при увеличении угла β усилие прорезания Q_p будет уменьшаться и при β приближающемся к 180° будет приближаться к нулю. Максимальное усилие прорезания возникает при $\beta = \beta_н$.

Полное максимальное усилие сопротивления всех слоев корда внедрению ножа Q_Σ будет равно:

$$Q_\Sigma = 2\sum_{k=1}^{m} l_k I_k N_{1нк}\sin^2_k\alpha\ \cos\frac{\beta_k}{2}, \qquad (5)$$

где $l_k, I_k, N_{1нк}, \alpha_k, \beta_k$ – соответственно, длина линии разреза слоя, частота нитей корда в слое, усилие натяжения нити, угол наклона нити, угол перегиба для k-го слоя металлокорда; m – количество слоев корда.

Полученное уравнение можно использовать, когда длина линии разреза (ширина слоев) разная. Если все слои имеют одинаковую длину l, то уравнение (5) можно представить в следующей форме

$$Q_\Sigma = q_\Sigma l = 2l\sum_{k=1}^{m} I_k N_{1нк}\sin^2_k\alpha\ \cos\frac{\beta_k}{2}, \qquad (6)$$

или

$$q_\Sigma = 2\sum_{k=1}^{m} I_k N_{1нк}\sin^2_k\alpha\ \cos\frac{\beta_k}{2}, \qquad (7)$$

где q_Σ – суммарная удельная сила сопротивления многослойного материала.

Полученные зависимости (6) и (7) справедливы для общего случая разрезания протекторных браслетов (металлокордных брекеров) под любым произвольным углом.

Проанализируем уравнение (7) применительно к различным слоям протекторных браслетов.

При резании протекторных браслетов по меридиану линию разреза будут пересекать нити корда следующих слоев:

– экранирующих брекерных слоев, для которых $\alpha_k = 90°$;

– основных слоев металлокорда, для которых $\alpha_k = \pm 70°$;

– каркасных слоев, для которых $\alpha_k \approx 0°$.

Для экранирующих слоев протекторных браслетов при разрезании по меридиану при $\alpha_k = 90°$ имеем

$$q_\Sigma = 2mI_э N_{1нэ} \cos\frac{\beta_{эм}}{2}. \quad (8)$$

Для двух слоев брекера ($\alpha_k = \pm 70$)

$$q_\Sigma = 3,532 I_б N_{1нб} \cos\frac{\beta_{бм}}{2}. \quad (9)$$

Для каркасных слоев ($\alpha_k = 0°$)

$$\alpha_k = 0°;\ q_\Sigma = 0. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что нити корда каркаса не рассекаются, так как их направление близко к линии разреза. Следовательно, эти слои при разрезании по меридиану можно не учитывать.

Составим уравнение для расчета удельной силы разрезания вдоль протекторных браслетов.

В этом случае направление нитей экранирующих слоев близко к линии разреза и они практически не рассекаются ножом.

Наоборот, нити корда каркаса направлены перпендикулярно линии разреза и потому перерезаются.

При разрезании вдоль протекторных браслетов угол наклона нитей по отношению к режущей кромке ножа составит $\alpha_k = 90° \alpha_{mk}$, где α_{mk} – угол наклона нитей по отношению к меридиану шины.

Тогда из уравнения (5) получим

$$q_\Sigma = 2\sum_{k=1}^{m} I_k N_{1нк} \cos^2_m \alpha_k \cos\frac{\beta_k}{2}. \quad (11)$$

Для двух слоев брекера ($\alpha_k = \pm 70°$)

$$q_\Sigma = 0,468 I_б N_{1нб} \cos\frac{\beta_{бэ}}{2}. \quad (12)$$

Для точного решения уравнений (11) и (12) необходимо знать фактические значения натяжения кордных нитей в каждом слое в один и тот же момент времени, а также и углы перегиба этих слоев корда, определить которые достаточно трудно. Поэтому рекомендуется следующий подход для оценки максимально возможного усилия разрезания Q_Σ (q_Σ).

Нити корда слоев экрана, брекера и каркаса находятся вблизи друг от друга. Так как за счет межслойного перекрещивания нити образуют жесткую структуру и взаимодействуют при разрезании протекторных браслетов, вводим следующие допущения:

1. Разрыв всех нитей происходит одновременно, когда натяжение кордных нитей в каждом слое достигает своего предельного значения <<luchin24.wmf>> (оно приводится в технической документации на корд).

2. Разные слои протекторных браслетов в момент разрезания имеют один и тот же средний угол перегиба $\beta_{ср}$.

Рассчитаем значения угла $\beta_{ср}$ по формуле

$$\beta_{ср} = 2\arccos\left[\frac{q_\Sigma}{2\sum_{k=1}^{m} I_k N_{1предк} \sin^2_k \alpha}\right]. \quad (13)$$

Проделав эту процедуру для большого круга протекторных браслетов, можно установить наиболее вероятные значения этих углов. Результаты полученных авторами расчетов представлены в таблице.

Из табл. 1 следует, что значения $\beta_{ср}$ укладываются в небольшой диапазон от 141,5° до 161,8°. Это позволяет сделать вывод, что $\beta_{ср}$ можно считать параметром уравнений (5)-(7) и в дальнейшем использовать его для прогнозирования усилий резания протекторных браслетов любых конструкций (при одном и том же угле заточки ножа).

Значения удельной силы разрезания и средних углов перегиба слоев протекторных браслетов

Типоразмер и модель шины	Удельная сила резания протекторных браслетов, кН/м		Средний угол перегиба $\beta_{ср}$ слоев протекторных браслетов, °	
	вдоль меридиана	вдоль экватора	вдоль меридиана	вдоль экватора
175/70R13, мод. МР11	288,75	190,14	161,80	146,82
205/70R14, мод. ИД-220	548,50	254,72	148,30	158,50
195/65R15, мод. Я-456	525,44	270,28	141,50	146,37

Учитывая, что максимальное усилие разрезания получается при меньшем $\beta_{ср}$, а экспериментальный угол перегиба слоев для всех исследованных шин превышает 140°, рекомендуется в расчетах шин с посадочным диаметром 13», 14», 15» принимать угол перегиба $\beta_{ср}$ равным 140°.

Выводы

1. Физические процессы, протекающие при переработке изношенных автомобильных шин, в значительной степени отличаются от процессов, протекающих при разрезании твердых материалов. Существующие методы анализа и прогноза результатов разрезания изношенных шин в основном ориентированы на материалы, сохраняющие свои упругопластические свойства в узких пределах возможных деформаций, так как шины способны сохранять такие свойства при значительно больших деформация и переходить из неравновесного состояния в равновесное в процессе релаксации, поэтому такие методы к исследуемым процессам неприменимы.

2. Полученные расчетные данные являются на сегодняшний день актуальными, поскольку позволяют обоснованно производить выбор рациональных вариантов перерабатывающего оборудования с учетом конструктивных особенностей, рассчитывать его производительность и энергосиловые характеристики, а также проектировать и разрабатывать технологические процессы утилизации изношенных автомобильных шин и резинотехнических изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко И.Н. Анализ системы переработки и рециклинга утилизируемой техники в России и зарубежом / И.Н. Кравченко, И.А. Золотов, И.В. Лучин // Научно-технический сборник: Вып. №23. – Балашиха: ВТУ при Спецстрое России, 2012. – С. 115 – 119.

2. Кравченко И.Н. Исследования процесса абразивного измельчения изношенных автомобильных шин при утилизации / И.Н. Кравченко, И.В. Лучин, А.Л. Чернуха // Научно-технический сборник, выпуск № 25. – Балашиха: ВТУ, 2014. – С. 80-84.

3. Патент № 139646, Российская Федерация, МПК B29B 17/00. Устройство для разрезания покрышек / И.Н. Кравченко, И.В. Лучин, И.А. Золотов и др.; заявитель и патентообладатель ФГБВОУ ВПО «Военно-технический университет» МО РФ (RU). – 2013151270/05; заявл. 19.11.2013; опубл. 20.04.2014. – Бюл. № 11.

4. Плотников Р.С. Дисковое ножевое устройство для разрезания // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – №1. – С. 43-45.

5. Плотников Р.С. Разработка процессов и оборудования для разрезания изношенных автопокрышек с целью их утилизации: дис…канд. техн. наук. – Ярославль, 2007. – 126 с.