

DOI: 10.34031/2071-7318-2054-10-4-133-143

***Чуев К.В., Дуюн Т.А., Дуганов В.Я., Дегтярь А. Н., Кравченко В.М.**
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: kirill.chuev@gmail.com

ИМИТАЦИОННОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВОГО КОЛЬЦА

Аннотация. Статья посвящена исследованию процесса извлечения бортового кольца из изношенных крупногабаритных автомобильных шин с использованием имитационного динамического моделирования. Проблема переработки шин рассматривается в контексте глобального экологического кризиса, связанного с накоплением твёрдых отходов, а также в аспекте повышения эффективности технологий утилизации. Основное внимание уделено анализу конструктивных и технологических параметров установки для извлечения бортового кольца, влияющих на максимальные напряжения и деформации. Разработаны математические модели, описывающие зависимость напряжений и деформаций в кольце от ширины щели мишени, ширины крюка оборудования и площади поперечного сечения кольца. В ходе исследования проведён полный трёхфакторный эксперимент второго порядка, построен ротатабельный центральный композиционный план, по которому определены ключевые зависимости и оптимальные параметры процесса. Построены 3D-графики, иллюстрирующие влияние факторов на механические характеристики кольца. Установлено, что минимизация ширины щели мишени и оптимальный подбор ширины крюка повышают эффективность процесса. Предложены рекомендации по модернизации оборудования, включая использование адаптивных мишеней и методов предварительного ослабления сцепления резины и металла, что позволит снизить энергозатраты и повысить эффективность переработки шин.

Ключевые слова: оборудование для утилизации резино-технических изделий (РТИ), переработка шин, крупногабаритные шины (КГШ), имитационное моделирование.

Введение. Утилизация изношенных автомобильных шин является одной из значительных экологических и технологических проблем современного общества. Ежегодно в мировом масштабе формируется свыше миллиарда единиц таких отходов, что создает значительное антропогенное воздействие на окружающую среду [1]. Неэффективные методы утилизации и хранения шин способствуют накоплению токсичных соединений в экосистемах, увеличению объемов твёрдых отходов на полигонах, а также повышению риска неконтролируемых возгораний, сопровождающихся выделением вредных веществ [2].

В условиях перехода к концепции экономики замкнутого цикла переработка изношенных шин рассматривается как перспективный путь решения указанных проблем. Ценные компоненты, содержащиеся в шинах, включая полимерные материалы, металлические элементы и текстильное армирование, могут быть извлечены и использованы повторно, что способствует снижению нагрузки на природные ресурсы и развитию экологически ориентированных технологий [3].

Особое значение приобретает разработка и внедрение высокоэффективных методов переработки, направленных на извлечение металлических компонентов, таких как металлический корд

и бортовое кольцо [4]. Это обусловлено их значительным потенциалом для повторного применения в металлургической, строительной и других отраслях промышленности.

В крупногабаритных автомобильных шинах металлические включения, в частности бортовое кольцо, представляют собой армирующую конструкцию, обеспечивающую прочность и жёсткость соединения шины с ободом колеса. Для эффективной переработки изношенных шин извлечение металлического бортового кольца является важным этапом, поскольку это позволяет снизить объём отходов, улучшить качество получаемой резиновой фракции и минимизировать экологический ущерб [5].

Существуют различные методы извлечения бортового кольца, которые зависят от конструкции шин и доступных технологий [6]. Одним из таких методов является термическое воздействие, при котором шина нагревается для ослабления связи между резиной и металлическим кольцом [7, 8]. Этот подход позволяет упростить процесс извлечения, однако требует тщательного контроля температуры и использования систем очистки газов для предотвращения выделения вредных веществ. Ещё одним технологически сложным, но эффективным методом является криогенная обработка [9]. В этом случае шина замораживается до сверхнизких температур, что делает резину хрупкой и облегчает её отделение

от металла, сохраняя при этом структуру металлического кольца.

Альтернативой может служить — гидравлический метод, предполагающий использование давления для разрыва связи между резиной и металлом [10]. Однако данный способ имеет ограниченную эффективность, особенно при работе с шинами сложной конструкции, и требует значительных энергозатрат. Более распространённым и практичным решением является механическое разделение. Этот метод включает использование специализированного оборудования, которое позволяет вырезать или вытягивать кольцо с минимальными повреждениями резиновой части изделия [11].

Выбор метода зависит от характеристик шин, масштабов переработки и особенностей используемого оборудования [12, 13, 14]. Оптимизация процессов извлечения металлических компонентов из шин представляет собой важное направление в развитии технологий переработки, способствующее снижению экологической нагрузки и улучшению переработки полимерных материалов.

Основная часть.

Цель исследования заключается в повышении эффективности процесса извлечения бортового кольца из изношенных крупногабаритных автомобильных шин путем оптимизации конструктивных и технологических параметров оборудования для переработки РТИ, а именно извлечения бортовых колец из борта шин. Для достижения цели необходимо проанализировать методы извлечения бортовых колец, разработать математическую модель процесса извлечения, провести имитационное динамическое моделирование, для нахождения оптимальных вариантов конструкции изделия.

Процесс удаления бортового кольца можно разделить на несколько этапов (рис. 1). Сначала колесо поступает в рабочую зону оборудования и подвешивается на крюк 2, шириной B (рис. 2а). Рабочий процесс начинается с захвата крюком 2 бортового кольца 3, после чего резиновый борт колеса 4 упирается в мишень 1, шириной s (рис. 2б). Когда достигается необходимая сила для извлечения кольца 3, крюк 2 постепенно вытягивает его через мишень 1 (рис. 2в), увеличивая расстояние l рабочего хода крюка. Рабочий цикл завершается полным извлечением бортового кольца из покрышки (рис. 2г).

Процесс извлечения бортового металлического кольца из резиновой оболочки представляет собой сложную задачу, которая требует

учета как физических, так и геометрических факторов. Металлическое кольцо находится в плотном контакте с резиновым материалом, что создает значительные силы трения, сцепления и адгезии между материалами [15]. Кроме того, геометрическая форма кольца и его расположение в резиновой оболочке усложняют процесс извлечения, особенно при наличии искривлений, локальных деформаций или разрывов.

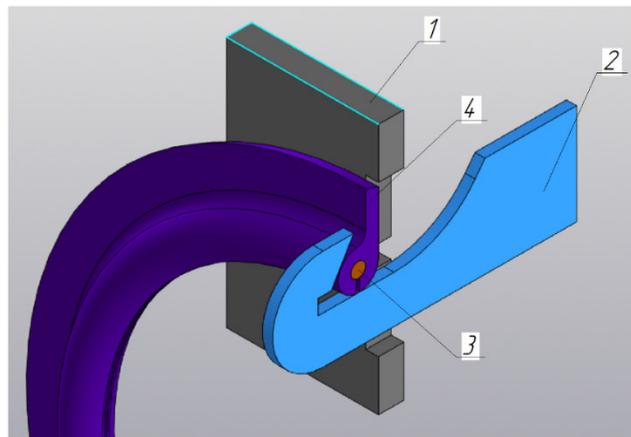


Рис. 1. Разрез модели процесса извлечения бортового кольца из шины: 1 – мишень; 2 – крюк; 3 – бортовое кольцо; 4 – резиновый борт шины

В общем виде баланс сил процесса удаления бортового кольца можно представить в виде уравнения (1):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \sum F_{kx} \rightarrow \begin{cases} x(t) \\ x(v) \rightarrow v(t, s) \\ x(t, v, s) \end{cases} \quad (1)$$

Силу, необходимую для извлечения бортового кольца, можно разложить на несколько составляющих (2):

$$\sum F_{kx} = F - F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (2)$$

где F_{kx} – усилие необходимое для извлечения бортового кольца, Н;

F – усилие, развиваемое оборудованием, Н

F_1 – усилия, необходимые для преодоления адгезии между стальной проволокой и резиновой оболочкой., Н;

F_2 – усилия, необходимые для разрыва резиновой оболочки бортовой части колеса., Н;

F_3 – усилие, затрачиваемое на деформацию бортового колеса, Н;

F_4 – усилия, необходимые для преодоления силы трения и других негативных факторов., Н;

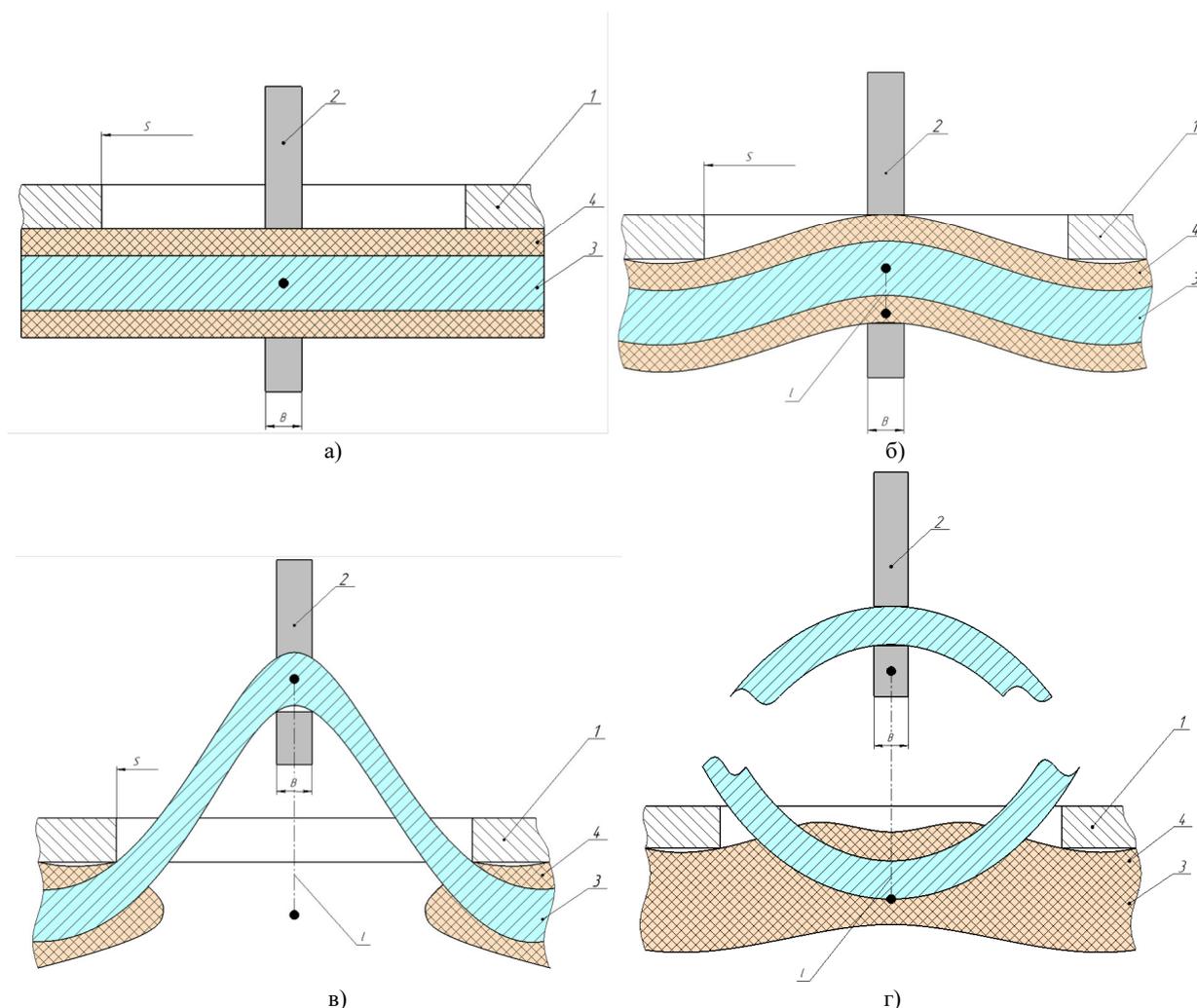


Рис. 2. Принципиальная схема процесса извлечения бортового кольца: а – исходное положение; б – начало рабочего процесса извлечения бортового кольца; в – рабочий процесс извлечения при достижении необходимого усилия; г – окончание процесса извлечения

Усилие на преодоление адгезии (F_1) — связано с преодолением сил сцепления между металлической поверхностью кольца и резиновой оболочкой. Адгезионные силы зависят от качества контакта материалов, их химической совместности и наличия защитных или соединительных покрытий (например, латунного слоя на проволоке).

Усилие по разрыву резиновой части борта шины (F_2) — возникает при повреждении и разрушении резиновой оболочки вследствие извлечения металлического бортового кольца. Это усилие определяется прочностью резины на разрыв, её деформационной способностью, толщиной резиновой оболочки и толщиной бортового кольца.

Деформационные усилия (F_3) — обусловлены сопротивлениями резинового борта и стальной проволоки, которые обладают упругостью и стремятся восстановить свою форму. Эти усилия зависят от физико-механических характеристик резины и стали, таких как жесткость, модуля

упругости и геометрических параметров, таких как площадь поперечного сечения резинового борта и бортового кольца.

Усилия, затрачиваемые на преодоление вредных факторов (F_4) — включают дополнительные нагрузки, вызванные загрязнениями, коррозией металлического кольца, а также заклиниванием кольца в результате деформаций или повреждений.

Проволока бортовых колец в шинах — это высокопрочная стальная проволока, которая используется для армирования бортов шин, чтобы выдерживать значительные нагрузки, возникающие при монтаже шины на обод и её эксплуатации под давлением. Для изготовления проволоки бортовых колец шин используются высокоуглеродистые или легированные стали обладающие высокой упругостью, пределом прочности, устойчивостью к коррозии и деформации. Проволока часто покрывается латунным или цинковым слоем, чтобы улучшить сцепление с резиной и защитить от коррозии.

Основные физико-механические характеристики проволоки отражены в ГОСТ 14959-79 и

ГОСТ 26366-84 и имеют свойства, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Наименование	Обозначение	Значение
Предел прочности при растяжении	(σ_B)	1500–2000 МПа
Предел текучести	($\sigma_{0.2}$)	1200–1800 МПа
Модуль упругости	(E)	200 ГПа
Коэффициент Пуассона	(ν)	0,27–0,3
Удлинение при разрыве	(δ)	2–4%
Твердость в диапазоне	-	450–550 HV
Диаметр проволоки	d	0,9 - 2,0 мм

Для оптимизации процесса извлечения бортового кольца из шин и разработки рекомендаций по модернизации оборудования был проведён полный трёхфакторный эксперимент второго порядка. Для этого был построен ротатбельный центральный композиционный план второго порядка [16]. Выходным параметром функции отклика $[\sigma]$, $Dx = f(s, b, A_{бк})$ является значение максимального напряжения, возникающего в элементах по Мизесу ($[\sigma]$, МПа) и максимальное значение деформации (Dx , мм). В качестве факторов эксперимента выбраны: ширина щели ми-

шени в упорной плите оборудования (s , мм), ширина крюка оборудования – (b , мм) и площадь поперечного сечения бортового кольца ($A_{бк}$, мм²).

Для получения ЦКП второго порядка для трех факторов, к полному факторному эксперименту («ядру» плану, точки 1-8) добавляют шесть «звездных» точек (точки 9-14) с координатами (+ α ;0;0); (- α ;0;0); (0;+ α ;0); (0;- α ;0); (0;0;+ α); (0;0;-2) и точку 15 в центре плана В соответствии с изменяемыми факторами и схемой трехфакторного пространства (рисунок 3) была построена таблица 2 с условиями эксперимента.

Таблица 2

Условия экспериментов

Обозначение факторов		Уровни факторов										Интервалы варьирования факторов
натуральное	кодирование	“Звёздный +”		Верхний		Основной		Нижний		“Звёздный -”		
		натуральное	кодированное	натуральное	кодированное	натуральное	кодирование	натуральное	кодированное	натуральное	кодированное	
s , мм	x_1	351,2	+a	300	+1	225	0	150	-1	98,85	-a	75
b , мм	x_2	36,82	+a	30	+1	20	0	10	-1	3,18	-a	10
$A_{бк}$, мм ²	x_3	488,2	+a	420	+1	320	0	220	-1	151,8	-a	100

Для перехода от кодированных значений к натуральным следует использовать формулу:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0}{\Delta x_i} \tag{3}$$

где $x_i = \pm 1,68; \pm 1; 0$ – кодированное значение i -го фактора;

\tilde{x}_i – натуральное значение i -го фактора;

\tilde{x}_i^0 – натуральное значение основного уровня i -го фактора;

Δx_i – интервал варьирования i -го фактора,

$$\Delta x_i = \frac{1}{2}(\tilde{x}_{i \max} - \tilde{x}_{i \min});$$

$\tilde{x}_{i \max} - \tilde{x}_{i \min}$ – натуральные значения верхнего и нижнего уровней i -го фактора.

В таблице 3 представлена матрица ротатбельного равномерного планирования второго порядка применительно к задачам исследования.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить расчёты, включающие в себя оценку усилия, необходимого для извлечения бортового кольца, напряжений, возникающих в бортовом кольце, а также конструктивных параметров установки и технологических характеристик бортового кольца. Для этого был использован метод конечных элементов. В ходе исследования был построен ряд параметрических моделей, на которые в дальнейшем была наложена конечно-элементная сетка, применены ограничения и приложены нагрузки (рис. 4).

бортового кольца из борта шины при проведении натурального эксперимента [17].

Для моделирования соприкосновения опорной плиты и бортового кольца применён объект

симуляции — контакт "поверхность-поверхность".

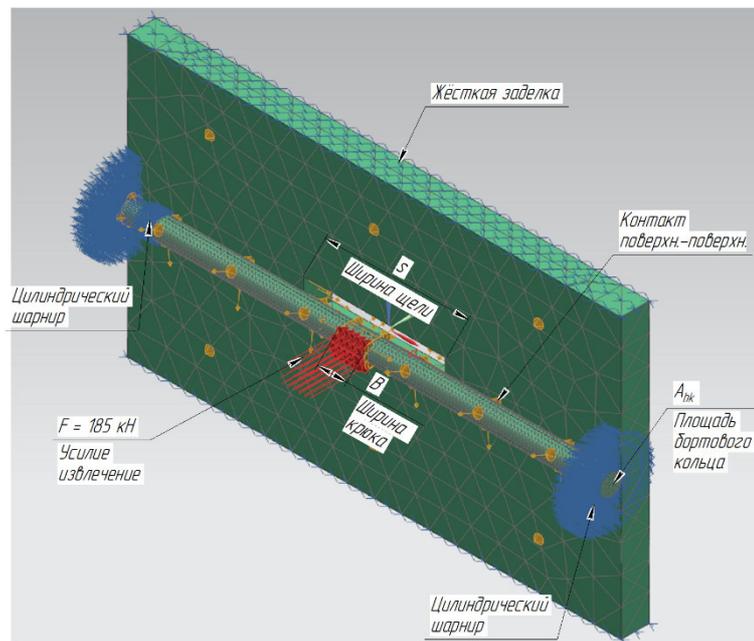


Рис 4. КЭ модель бортового кольца с упорной плитой в сборе с наложенными ограничениями, нагрузками и объектами симуляции

В ходе исследования были вычислены конечно-элементные модели с двумя необходимыми параметрами (рис. 5), которые были добавлены в таблицу 2 в качестве выходных данных.

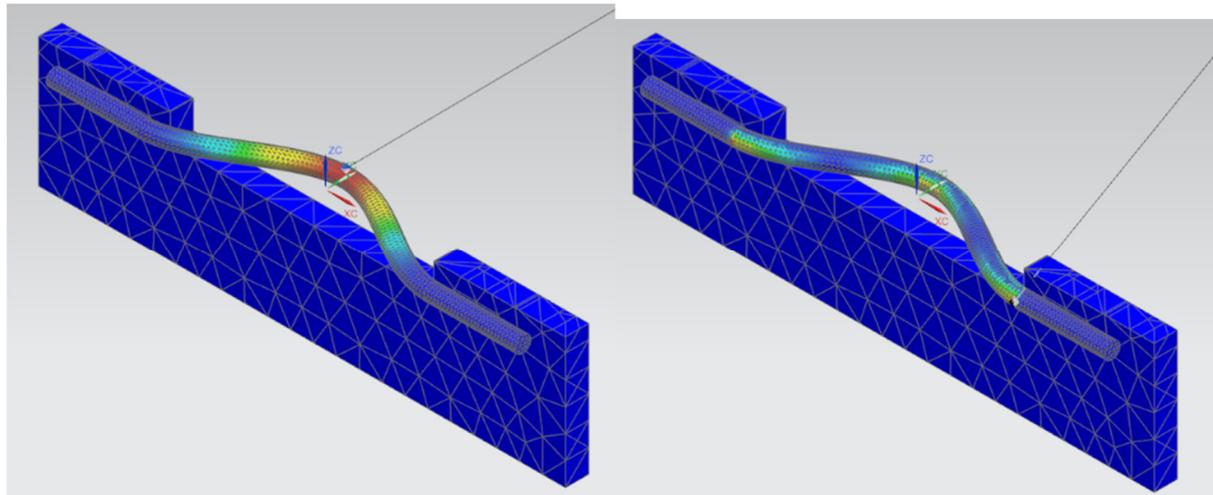


Рис 5. Результаты КЭ анализа при проведении 14 опыта

Для нахождения математических зависимостей максимального напряжения ($[\sigma]$, Мпа) и максимальной деформации (Dx , мм), возникающих в бортовом кольце, от ширины щели мишени (s , мм), ширины крюка оборудования (b , мм) и площади поперечного сечения бортового кольца ($A_{бк}$, мм²) необходимо найти коэффициенты регрессии. Так как матрица планирования ротационного эксперимента не ортогональна, то коэффициенты регрессии определяют по формулам (4-7)

Свободный член:

$$b_0 = \frac{A}{N} [2\lambda^2 (k + 2) \sum_{j=1}^N y_j - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j] \quad (4)$$

Коэффициенты при линейных членах:

$$b_i = \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j \quad (5)$$

Коэффициенты при парных взаимодействиях:

$$b_{ii} = \frac{c^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j \quad (6)$$

Коэффициенты при квадратичных членах:

$$b_{ii} =$$

$$\frac{A}{N} \{c^2[(k+2)\lambda - k] \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + c^2(1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j\} \quad (7)$$

где i – номер столбца матрицы; j – номер опыта; x_{ij} – элемент соответствующего столбца матрицы; y_j – значение выходного параметра в j – том опыте; N – число опытов ($N = 15$); k – кол-во факторов ($k = 3$); табулированные константы, для $k = 3 \lambda = 0,858$; $A = 0,452$; $c = 1,464$;

После обработки данных эксперимента были получены уравнения регрессии в закодированном виде для максимального напряжения ($[\sigma]$, Мпа) (8) и максимальной деформации (Dx , мм) (9):

$$Y_1 = 10382,7 + 2516,9 \cdot x_1 - 640,8 \cdot x_2 - 4309,9 \cdot x_3 - 314,9 \cdot x_1 \cdot x_2 - 997,9 \cdot x_1 \cdot x_3 + 108,2 \cdot x_2 \cdot x_3 + 2043,1 \cdot x_1^2 + 2098,7 \cdot x_2^2 + 4057,9 \cdot x_3^2 \quad (8)$$

$$Y_2 = -21,4 + 10,5 \cdot x_1 - 0,1 \cdot x_2 - 9,7 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 - 6,5 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,07 \cdot x_2 \cdot x_3 + 6,1 \cdot x_1^2 + 3,7 \cdot x_2^2 + 8,1 \cdot x_3^2 \quad (9)$$

После раскодирования уравнения (8) и (9) принимают вид (10) и (11), соответственно.

$$[\sigma] = 56696,62 - 78,873 \cdot s + 6,516 \cdot b - 274,03 \cdot A_{\text{БК}} - 0,42 \cdot s \cdot b - 0,13 \cdot s \cdot A_{\text{БК}} + 0,11 \cdot b \cdot A_{\text{БК}} + 0,36 \cdot s^2 + 20,99 \cdot b^2 + 0,41 \cdot A_{\text{БК}}^2 \quad (10)$$

$$D_x = 68,1 - 0,21 \cdot s - 1,29 \cdot b - 0,32 \cdot A_{\text{БК}} - 0,000053 \cdot s \cdot b - 0,000867 \cdot s \cdot A_{\text{БК}} + 0,00007 \cdot b \cdot A_{\text{БК}} + 0,0011 \cdot s^2 + 0,04 \cdot b^2 + 0,00081 \cdot A_{\text{БК}}^2 \quad (11)$$

Ширина крюка (b) оказывает умеренное влияние на напряжение $[\sigma]$ и деформацию Dx , главным образом через распределение нагрузки на бортовое кольцо. Увеличение b снижает концентрацию напряжений, так как нагрузка распределяется на большую площадь, что уменьшает риск повреждений кольца. При слишком малой ширине ($b \rightarrow 7$ мм) напряжение и деформация возрастает из-за высокой концентрации сил на малой площади контакта. Оптимальное значение ширины крюка ($b=20$ мм) обеспечивает баланс

между минимальными напряжениями и умеренными деформациями, тогда как увеличение b выше 30 мм незначительно влияет на процесс и приводит к избыточным конструктивным затратам.

Зависимости максимального напряжения $[\sigma]$ и максимальной деформации Dx возникающих в бортовом кольце, от ширины щели мишени s и площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{БК}}$ при фиксированной ширине крюка $b = 20$ мм представлены в виде 3D графиков на рис. 6.

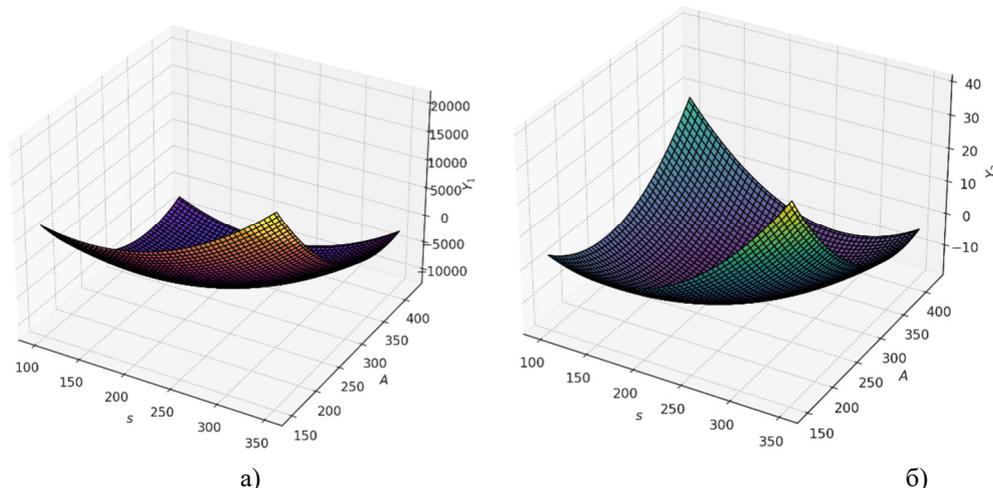


Рис 6. 3D графики зависимостей максимального напряжения $[\sigma]$ (а) и максимальной деформации Dx (б), возникающих в бортовом кольце при фиксированном значении ширины крюка оборудования $b = 20$ мм

Фактор s – ширина щели значительно влияет на оба параметра. Увеличение s ведёт к росту напряжений $[\sigma]$, аналогично, растёт и деформация Dx , но более плавно. С увеличением фактора $A_{\text{БК}}$ напряжение $[\sigma]$ растёт, что связано с изменением геометрических характеристик кольца, а деформация Dx увеличивается менее резко, так как увеличение $A_{\text{БК}}$ повышает жёсткость системы.

Для оптимизации процесса извлечения бортового кольца из изношенных шин рекомендуется минимизировать ширину щели мишени (s), либо применить адаптивную мишень с регулируемой шириной щели, что позволит учитывать геометрические параметры различных шин. Для уменьшения адгезии между бортовым кольцом и резиновым покрытием целесообразно применять

предварительное ослабление сцепления кольца и резины с помощью термической обработки, ультразвука или криогенного воздействия перед механическим извлечением. Для уменьшения сил трения целесообразно применять материалы мишени с низким коэффициентом трения.

Вывод. Проведенное имитационное динамическое исследование показало, что процесс извлечения бортового кольца из изношенных шин значительно зависит от ширины щели мишени (s), ширины крюка оборудования (b) и площади поперечного сечения кольца ($A_{\text{БК}}$), которые влияют на величины напряжений и деформаций. Увеличение s приводит к росту напряжений и деформаций, причём напряжения растут более интенсивно, что связано с концентрацией нагрузки. Увеличение $A_{\text{БК}}$ повышает напряжение за счёт увеличения жёсткости кольца, но менее существенно влияет на деформацию. Ширина крюка (b) играет ключевую роль в распределении нагрузки: при $b = 20$ мм достигается оптимальный баланс между минимальными напряжениями и умеренными деформациями, тогда как меньшие значения b увеличивают риск повреждений кольца. Оптимизация геометрических параметров оборудования, снижение сил трения и адгезии, а также использование предварительных методов ослабления связи между кольцом и резиной позволяют значительно повысить эффективность процесса и сохранить целостность извлекаемых компонентов. Результаты могут быть применены для разработки энергоэффективных технологий переработки шин, способствующих снижению экологической нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. De S.K., Isayev A., Khait K. Rubber Recycling. CRC Press, 2005. 528 p DOI:10.1201/9780203499337.
2. Zheng X., Pramanik A., Basak A.K., Prakash C. Material Recovery and Recycling of Waste Tyres—A Review // Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. 100115. DOI:10.1016/j.clema.2022.100115.
3. Вольфсон С.И., Фафурина Е.А., Фафурин А.В. Методы утилизации шин и резинотехнических изделий // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №1. С. 45–52.
4. Formela K. Sustainable Development of Waste Tires Recycling Technologies: Recent Advances, Challenges and Future Trends // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2021. Vol. 4, Issue 3. Pp. 209–222. DOI:10.1016/j.aiepr.2021.06.004.
5. Чуев К.В. Предварительная разделка изношенных шин // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября

2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 45–48. EDN ZQTXNH.

6. Дуганов В.Я., Дуюн Т.А., Чуев К.В., Архипова Н. А., Кравченко В. М., Чуева Ю. А. Проблемы утилизации крупногабаритных автомобильных шин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 11. С. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112

7. Макаров А.В. Некоторые аспекты рециклинга изношенных автомобильных покрышек методом пиролиза // Вестник ТОГУ. 2008. С. 247–258.

8. Яцун А.В., Коновалов П.Н., Коновалов Н. П. СВЧ-пиролиз изношенных автомобильных шин в присутствии гидроксида калия // Современные наукоемкие технологии. 2017. С. 83–87.

9. Бондаренко Е.В., Клищенко В.П., Пославский А.П., Сорокин В.В. Формирование энергоэффективной технологии утилизации автомобильных шин // Мир транспорта и технологических машин. 2011. С. 47–52.

10. Пат. 2317195 С1, Российская Федерация, МПК В29В 17/02. Установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации: / А. М. Горлачев, В. Н. Калмыков, В. И. Фарафонов; заявитель ООО НПП "ИнТехОс-ТМЗ". № 2006118174/12: заявл. 29.05.2006: опубл. 20.02.2008.

11. Пат. 201698, Российская Федерация, МПК В29В 17/02. Установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации: / В.Я. Дуганов, Н.А. Архипова, К.В. Чуев, Ю.А. Чуева; заявитель ФГБОУ ВО «БГТУ им. Шухова» № 2020133204 : заявл. 08.10.2020 : опубл. 28.12.2020

12. Чуев К. В., Кравченко В. М., Мутовалов Э. А. Основные виды утилизации резинотехнических изделий // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. С. 49–52.

13. Zhetesova G.S., Dandybaev E.S., Zhunuspekov D.S., Zhekibaeva K.K. Improvement of the Organization of Maintenance and Repair of Dump-Cars // Material and Mechanical Engineering Technology. 2020. №1. Pp. 33–38. DOI:10.17580/gzh.2022.04.15.

14. Bochkaryov Y., Ishkov A. The Operational Reliability of Quarry Dump Trucks BELAZ-7540 in the Placer Deposits // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Pp. 325–332. DOI:10.5593/sgem2020/1.2/s03.042.

15. Лучин И.В., Кравченко И.М., Конкин М.Ю. Методика расчета процесса разрушения

изношенных автомобильных шин и резинотехнических изделий при утилизации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8.4. С. 11–15.

16. Симогин А.А. Применение планирования эксперимента при построении математической модели в области оптимума // Сборник научно-методических работ. Том 11. Донецк: Донецкий

национальный технический университет, 2019. С. 195–202. EDN GESOAG.

17. Чуев К.В. Технологические аспекты извлечения металлических компонентов из резинотехнических изделий // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2024. № 12. С. 106–115. DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-12-106-115. EDN DCQCSK.

Информация об авторах

Чуев Кирилл Витальевич, аспирант кафедры технология машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой технология машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуганов Владимир Яковлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технология машиностроения. E-mail: dvuybgtu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дегтярь Андрей Николаевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: andrey-dandr@yandex.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кравченко Владимир Михайлович, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: livenes.vova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.01.2025 г.

© Чуев К.В., Дуюн Т.А., Дуганов В.Я., Дегтярь А.Н., Кравченко В.М., 2025

***Chuev K.V., Duyn T.A., Duganov V.Y., Degtyar A.N., Kravchenko V.M.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**kirill.chuev@gmail.com*

SIMULATION-BASED DYNAMIC MODELING OF THE BEAD WIRE EXTRACTION PROCESS

Abstract. The article focuses on investigating the bead wire extraction process from used large-sized automotive tires using simulation-based dynamic modeling. The issue of tire recycling is considered in the context of the global ecological crisis associated with the accumulation of solid waste. The study substantiates the need for efficient tire recycling technologies, including the extraction of metal components such as the bead wire, which contributes to reducing environmental impact and promoting a circular economy. Special attention is given to analyzing the structural and technological parameters of the equipment used for bead wire extraction. Mathematical models describing the dependence of maximum stresses and deformations in the wire on the slot width of the target, hook width, and cross-sectional area of the wire are presented. Key dependencies are experimentally confirmed, and 3D graphs demonstrating the influence of factors on the strength and deformation characteristics of the wire are constructed. Recommendations for optimizing the process to enhance the efficiency of metal component extraction are proposed.

Ключевые слова: equipment for recycling rubber products, tire recycling, large-size tires (LST), simulation modeling.

REFERENCES

1. De S.K., Isayev A., Khait K. Rubber Recycling. CRC Press, 2005. DOI: 10.1201/9780203499337.

2. Zheng X., Pramanik A., Basak A.K., Prakash C. Material Recovery and Recycling of Waste Tyres—A Review. Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. 100115. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100115..

3. Wolfson S.I., Fafurina E.A., Fafurin A.V. Methods of recycling tires and rubber products [Metody utilizatsii shin i rezinotekhnicheskikh izdeliy]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2011. No. 1. Pp. 45–52. (rus)
4. Formela K. Sustainable Development of Waste Tires Recycling Technologies: Recent Advances, Challenges and Future Trends. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2021. Vol. 4, Issue 3. Pp. 209–222. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004.
5. Chuev K.V. Preliminary shredding of worn tires [Predvaritel'naya razdelka iznoshennykh shin]. Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo: Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnogo molodyozhnogo foruma, Belgorod, 23–24 oktyabrya 2023 goda. – Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova, 2023. Pp. 49–52. (rus)
6. Duganov V.Ya., Dyun T.A., Chuev K.V., Arkhipova N.A., Kravchenok V.M., Chueva Yu.A. Problems of recycling large-size tires [Problemy utilizatsii krupnogabaritnykh avtomobil'nykh shin]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112. (rus)
7. Makarov A.V. Some aspects of recycling worn tires by pyrolysis [Nekotorye aspekty retsiklinga iznoshennykh avtomobil'nykh pokryshok metodom piroliza]. Vestnik TOGU. 2008. Pp. 247–258. (rus)
8. Yatsun A.V., Konovalov P.N., Konovalov N. P. Microwave pyrolysis of worn tires in the presence of potassium hydroxide [SVCh-piroliz iznoshennykh avtomobil'nykh shin v prisutstvii gidroksida kaliya]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2017. Pp. 83–87. (rus)
9. Bondarenko E.V., Klishchenko V.P., Poslavskiy A.P., Sorokin V.V. Formation of an energy-efficient technology for recycling tires [Formirovanie energoэффективной tekhnologii utilizatsii avtomobil'nykh shin]. Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2011. Pp. 47–52. (rus)
10. Duganov V.Ya., Arkhipova N.A., Chuev K.V., Chueva Yu.A. Ustanovka dlya udaleniya trosy iz bokovoy chasti shiny pri utilizatsii. Patent RF, no. 201698, 2020. (rus)
11. Gorlachiev A.M., Kalmykov V.N., Farafonov V.I. Ustanovka dlya udaleniya trosy iz bokovoy chasti shiny pri utilizatsii. Patent RF, no. 2317195 C1, 2008. (rus)
12. Chuev K.V., Kravchenko V.M., Mutovalov E.A. Main types of recycling rubber products [Osnovnye vidy utilizatsii rezinotekhnicheskikh izdeliy]. Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo: Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnogo molodyozhnogo foruma, Belgorod, 23–24 oktyabrya 2023 goda. – Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova, 2023. Pp. 49–52. (rus)
13. Zhetesova G.S., Dandybaev E.S., Zhunuspekov D.S., Zhekibaeva K. K. Improvement of the Organization of Maintenance and Repair of Dump-Cars. Material and Mechanical Engineering Technology. 2020. № 1. Pp. 33–38. DOI: 10.17580/gzh.2022.04.15.
14. Bochkaryov Y., Ishkov A. The Operational Reliability of Quarry Dump Trucks BELAZ-7540 in the Placer Deposits. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Pp. 325–332. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.042.
15. Luchin I.V., Kravchenko I.M., Konkin M.Yu. Methodology for calculating the process of destruction of worn tires and rubber products during recycling [Metodika rascheta protsessy razrusheniya iznoshennykh avtomobil'nykh shin i rezinotekhnicheskikh izdeliy pri utilizatsii]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalkh issledovaniy. 2014. No. 8.4. Pp. 11–15. (rus)
16. Simogin A.A. Application of experimental planning in constructing a mathematical model in the field of optimum [Primenenie planirovaniya eksperimenta pri postroenii matematicheskoy modeli v oblasti optimuma]. Sbornik nauchno-metodicheskikh rabot. Tom 11. – Donetsk: Donetskii natsional'nyy tekhnicheskii universitet, 2019. Pp. 195–202. EDN GESOAG. (rus)
17. Chuev K. V. Technological aspects of extracting metal components from rubber products [Tekhnologicheskie aspekty izvlecheniya metallicheskikh komponentov iz rezinotekhnicheskikh izdeliy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 106–115. DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-12-106-115. EDN DCQCCK. (rus)

Information about the authors

Chuev, Kirill V. Postgraduate student. E-mail: kirill.chuev@gmail.com Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dyun, Tatiana A. Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duganov, Vladimir Y. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: dvybgtu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Degtyar, Andrei N. Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials. E-mail: andrey-dandr@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kravchenko, Vladimir M. Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: livnec.vova@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 28.01.2025

Для цитирования:

Чуев К.В., Дуюн Т.А., Дуганов В.Я., Дегтярь А.Н., Кравченко В.М. Имитационное динамическое моделирование процесса извлечения бортового кольца // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 133–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-133-143

For citation:

Chuev K.V., Duyn T.A., Duganov V.Y., Degtyar A. N., Kravchenko V.M. Simulation-based dynamic modeling of the bead wire extraction process. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 133–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-133-143