

# Расчетно-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния упругой вставки адаптера тележки модели 18-194-1



**В. П. Ефимов,**  
канд. техн. наук,  
ведущий научный  
сотрудник  
ОАО «ВНИИЖТ» –  
Уральское отделение



**В. А. Пранов,**  
канд. техн. наук, старший  
преподаватель Уральского  
государственного  
университета путей  
сообщения



**С. М. Буторин,**  
инженер ООО НПП  
«Уником-Сервис»



**А. Н. Баранов,**  
инженер ОАО  
НПК «Уралвагонзавод»

Предлагаемая расчетно-экспериментальная методика оценки упруго-прочностных характеристик полиуретановых деталей тележек грузовых вагонов хорошо соотносится с данными натурных экспериментов и может применяться для оценки напряженно-деформированного состояния упругих вставок адаптера буксовых узлов инновационных тележек. Исследования подтвердили наличие у детали проблемных зон, а также позволили разработать варианты усиления конструкции и наметить пути повышения эксплуатационной надежности вставок адаптера.

Одним из несущих элементов тележки модели 18-194-1 [1] является вставка адаптера, которая выполняет роль надбуксового рессорного подвешивания (рис. 1, 2). Наиболее остро вопрос о применении буксовых амортизаторов встал в связи с разработкой грузовых тележек нового поколения с нагрузкой на ось 25–30 тс, а также в связи со значительным повышением требований к эксплуатационной надежности и к обеспечению гарантийных межремонтных пробегов более 500 тыс. км. Для российских железных дорог разработано несколько инновационных тележек с повышенными осевыми нагрузками [2, 3], в конструкции которых реализованы буксовые амортизаторы.

Вставка устанавливается на адаптер подшипникового узла и является опорой боковой рамы. Известно, что в эксплуатации случаются преждевременные разрушения вставок по центру опорной части (рис. 1, поз. 1) и в местах соединения вертикальной стенки и опорной поверхности (рис. 1, поз. 2).

Таким образом, актуальным является вопрос оценки прочности и упругих свойств детали. Расчетно-экспериментальные исследования жесткости полиуретановых элементов буксового подвешивания проводились из материала «Дуотан» [4]. Предложенные аналитический и конечно-элементный расчеты

без учета нелинейности в поведении материала показали хорошее совпадение с экспериментом только по вертикальной жесткости. Анализ напряженного состояния деталей не проводился.

В основе данного исследования использовался метод конечных элементов, учитывалось нелинейное поведение материала детали из полиуретана, то есть решалась задача гиперупругого деформирования. Деталь моделировалась объемными конечными элементами в форме тетраэдра (рис. 3) как наиболее подходящими для получения слож-

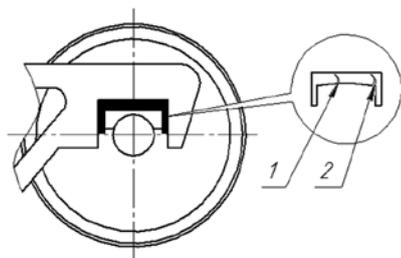


Рис. 1. Схема адаптерного буксового узла тележки и зоны появления трещин в полиуретановой вставке в эксплуатации



Рис. 2. Общий вид вставки адаптера



Рис. 3. Конечно-элементная модель вставки адаптера

Таблица 1. Начальные константы материала для уравнения Муни – Ривлина

Константа	C10	C01	C20	C11	C02	C30	C21	C12	C03
Значение константы, Па	-1,17 · 10 <sup>8</sup>	1,35 · 10 <sup>8</sup>	7,84 · 10 <sup>8</sup>	-1,76 · 10 <sup>9</sup>	1,06 · 10 <sup>9</sup>	7243	-1,26 · 10 <sup>5</sup>	-1,96 · 10 <sup>8</sup>	1,42 · 10 <sup>8</sup>

Таблица 2. Полученные константы материала для уравнения Муни – Ривлина

Константа	C10	C01	C20	C11	C02	C30	C21	C12	C03
Значение константы, Па	-5,87 · 10 <sup>7</sup>	6,77 · 10 <sup>7</sup>	3,94 · 10 <sup>8</sup>	-8,81 · 10 <sup>8</sup>	5,32 · 10 <sup>8</sup>	3621,5	-63301	-9,79 · 10 <sup>7</sup>	7,12 · 10 <sup>7</sup>

Таблица 3. Результаты испытаний вставок адаптера тележки продольной нагрузкой

№ образца	Величина деформации, мм, для продольной нагрузки		
	1,0 тс	3,0 тс	5,0 тс
1	0,21	0,93	1,45
2	0,25	1,14	1,85
3	0,16	0,61	0,9
4	0,39	1,1	1,62
5	0,76	1,37	1,81
6	0,33	0,92	1,33
Результаты расчета	0,38	1,13	1,84

Таблица 4. Результаты испытаний вставок адаптера тележки вертикальной нагрузкой

№ образца	Величина деформации, мм, для вертикальной нагрузки		
	5,0 тс	10,0 тс	15,0 тс
1	0,86	1,2	1,44
2	0,67	0,9	1,1
3	0,63	0,81	1,07
4	0,71	0,9	1,18
5	0,93	1,23	1,43
6	0,43	0,73	0,98
Результаты расчета	0,63	1,06	1,43

Таблица 5. Результаты испытаний вставок адаптера тележки поперечной нагрузкой

№ образца	Величина деформации, мм, для поперечной нагрузки	
	4,0 тс	8,0 тс
1	1,85	2,60
2	1,78	2,56
3	1,72	2,44
Результаты расчета	1,79	2,54

ной формы вставки, количество элементов составило 14 757, узлов – 25 110.

Основной характеристикой материала при расчете на прочность служит модуль упругости. Однако у полиуретана, как и у других эластомеров, модуль Юнга не является постоянной величиной при нагружении, а зависимость напряжение–деформация – нелинейная. Поэтому в качестве первоначальных данных для расчета были взяты величины напряжений, полученные при испытаниях образцов из полиуретана вулколлан 30 на растяжение [5] по стандартной методике ASTM D412 [6]. Полученная диаграмма приведена на рис. 4. Поскольку серийная деталь рассчитывалась для уретанового фторполимера марки ТТ-194 системы ТДИ по ТУ 22-06-5180710-2007 (ООО НПП «Уником-Сервис»), далее значения на диаграмме (рис. 4) корректировались в соответствии с опытными данными по экспериментально найденным величинам деформаций.

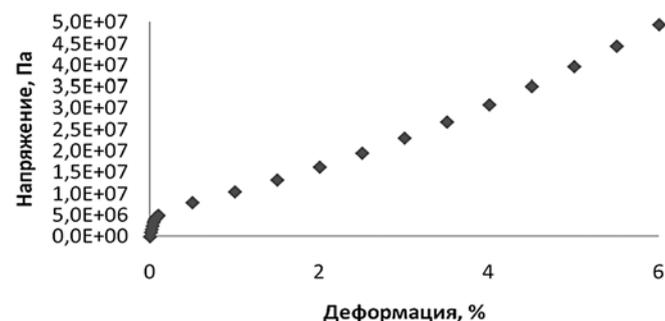


Рис. 4. Кривая напряжение–деформация при растяжении для вулколлана 30

В качестве расчетной использовалась девятипараметрическая модель Муни – Ривлина, так как она обладает низкой чувствительностью к качеству результатов испытаний. Согласно теории Муни – Ривлина, упругий потенциал является функцией инвариантов деформации, а выражение упругого потенциала через главные степени растяжения для изотропного несжимаемого материала представляется в виде

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + c_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + c_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + c_{02}(\bar{I}_2 - 3)^2 + c_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + c_{21}(\bar{I}_1 - 3)^2(\bar{I}_2 - 3) + c_{12}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3)^2 + c_{03}(\bar{I}_2 - 3)^3,$$

где  $W$  – упругий потенциал энергии деформации;

$\bar{I}_i$  – инвариант тензора деформаций;

$c_{ij}$  – константы материала.

На основе имеющейся диаграммы растяжения (рис. 4) полиуретановых образцов были рассчитаны величины  $c_{ij}$  (табл. 1). Полученные константы (табл. 1) были использованы при начальном расчете вставки адаптера. На рис. 5 показана схема нагружения и закрепления детали, используемая при расчетах (нагрузки прикладывались отдельно). Задача решалась методом Ньютона – Рафсона, который для случая конечно-элементной задачи имеет вид

$$K_i^T \{\Delta u_i\} = \{F_{np}\} - \{F_i\}$$

где  $[K_i^T]$  – матрица касательной жесткости;

$\{\Delta u_i\}$  – приращение вектора деформаций для  $i$ -й итерации;

$\{F_{np}\}$  – вектор приложенных сил;

$\{F_i\}$  – вектор сил полученных для  $i$ -й итерации.

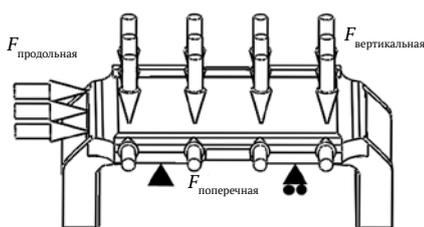


Рис. 5. Схема закрепления и нагружения вставки

По результатам расчета полученные константы материала были скорректированы (табл. 2, рис. 6).

В результате расчета с новыми константами были получены величины деформаций вдоль осей действия нагрузок. На рис. 7, 8 показаны поля деформаций для некоторых заданных усилий. Для получения опытных данных и верификации расчетной модели были проведены статические испытания полиуретановой вставки адаптера тележки на вертикальную, поперечную и продольную нагрузки. Детали предварительно нагружались три раза нагрузкой 10 тс. Температура во время проведения эксперимента составляла +20 °С. Было испытано шесть образцов на различную статическую нагрузку, при этом измерялась величина деформации деталей. Результаты расчета и опытные данные для продольного, поперечного и вертикального нагружений приведены в табл. 3–5.

Как видно из табл. 3–5, результаты расчета достаточно хорошо коррелируют с данными испытаний, конечно-элементная модель адекватно отражает поведение материала при различных видах нагружения.

Поскольку вставка испытывает различные виды деформаций при нагружении, то для оценки напряженного состояния использовались величины эквивалентных напряжений по четвертой теории прочности. Эквивалентные напряжения по Мизесу находили по формуле

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные действующие нормальные напряжения.

На рис. 9–12 показаны величины эквивалентных напряжений при некотором нагружении вставки. Как видно из расчетов, места изломов вставки в зоне поз. 1 (рис. 1) могут быть вызваны большими деформациями и напряжениями в местах

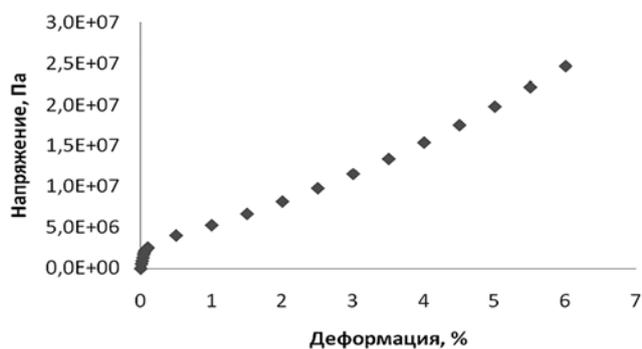


Рис. 6. Полученная кривая напряжение–деформация для испытанного материала

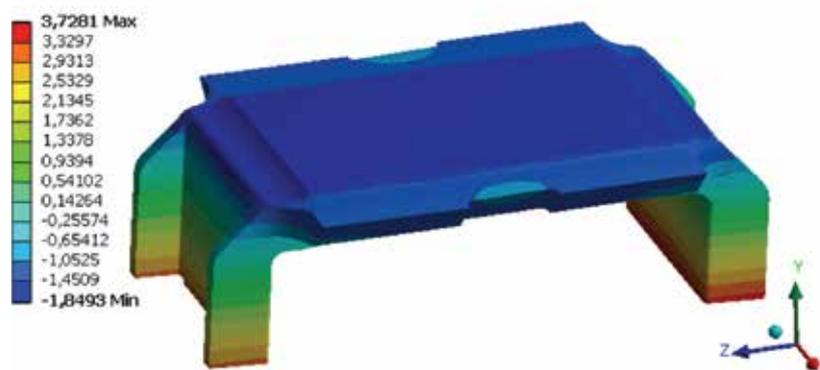


Рис. 7. Величина деформаций вдоль оси z в мм от продольной нагрузки 5 тс

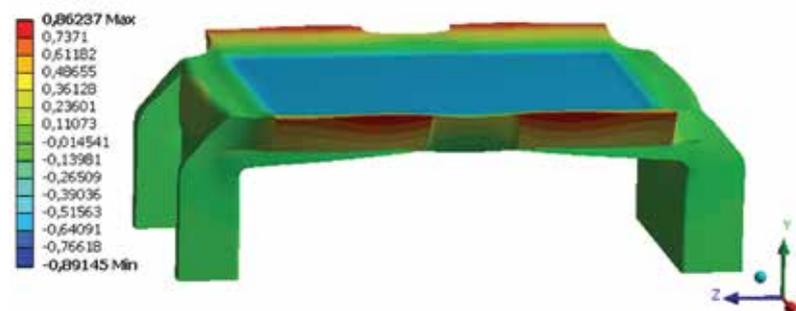


Рис. 8. Величина деформаций вдоль оси u в мм от вертикальной нагрузки 5 тс



Рис. 9. Величина эквивалентных напряжений в МПа для продольной нагрузки 5 тс, вид сверху

перехода опорных поверхностей в тело детали, т. е. местными концентраторами напряжений. Кроме того, наличие больших деформаций вставки в продольном и поперечном направлениях при относительно небольших нагрузках ведет к повышенному растяжению детали в зоне

поз. 2 (рис. 1), так как вертикальные стенки при этом остаются неподвижными, поскольку они зажаты между адаптером и боковой рамой тележки. Следовательно, для повышения эксплуатационной надежности вставки адаптера необходимо применять полиуретан марки «Уник-

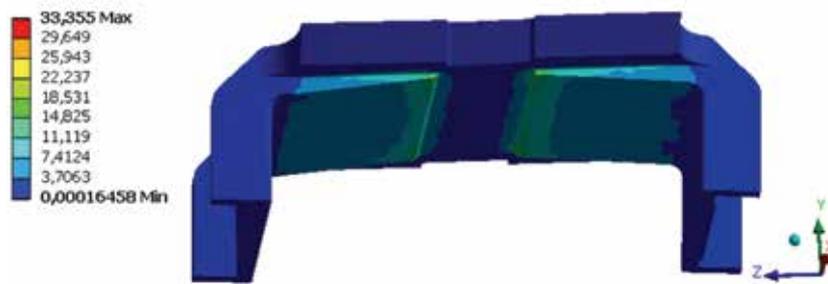


Рис. 10. Величина эквивалентных напряжений в МПа для продольной нагрузки 5 тс, вид снизу



Рис. 11. Величина эквивалентных напряжений в МПа для вертикальной нагрузки 5 тс, вид сверху

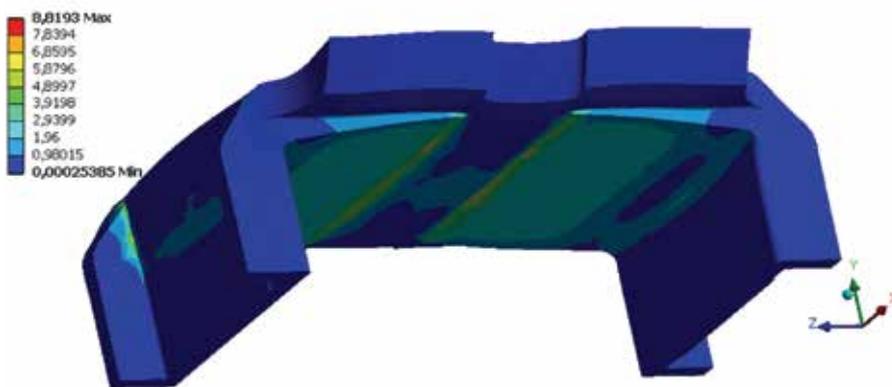


Рис. 12. Величина эквивалентных напряжений в МПа для вертикальной нагрузки 5 тс, вид снизу

спур», обладающий улучшенными физико-механическими свойствами, не чувствительный к большим деформациям, но обладающий достаточной жесткостью для восприятия комбинированных на-

грузок. Перспективными направлениями повышения прочности и долговечности вставок адаптера являются применение составных конструкций типа «сэндвич» или применение армированных вставок

адаптера из полиуретана марки «Уникспур 1А 700».

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Полученная расчетно-экспериментальная методика хорошо соотносится с данными натурных экспериментов и может применяться для оценки напряженно-деформированного состояния упругих вставок адаптера буксовых узлов инновационных тележек. Проведенные исследования подтвердили наличие проблемных зон детали, а так же позволили разработать варианты усиления конструкции и наметить пути повышения эксплуатационной надежности вставок адаптера.

Т

#### Литература

1. Ефимов В. П., Пранов А. А., Баранов А. Н., Белоусов К. А. Тележка для грузовых вагонов нового поколения с повышенными осевыми нагрузками // Железнодорожный транспорт. 2009. № 6. С. 58–61.
2. Бороненко Ю. П., Орлова А. М. Тележки с повышенной осевой нагрузкой // Железнодорожный транспорт. 2008. № 10. С. 50–53.
3. Коссов В. С., Чаркин В. А., Добрынин Л. К. и др. Тележка с осевой нагрузкой 25 тс для грузового вагона нового поколения // Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 55–58.
4. Бороненко Ю. П., Орлова А. М., Васильев С. Г. и др. Полиуретановые элементы буксового подвешивания тележки грузовых вагонов // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. науч. ст. СПб.: ПГУПС, 2003. С. 39–45.
5. Потураев В. Н., Дырда В. И. Резиновые детали машин. М.: Машиностроение, 1977. 216 с.
6. ASTM D412. Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers–Tension.

портал для специалистов транспортной отрасли  
[www.rostransport.com](http://www.rostransport.com)

ЖУРНАЛ О НАУКЕ, ЭКОНОМИКЕ, ПРАКТИКЕ  
**ТРАНСПОРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Об издании | Распространение | Мероприятия | Подписка | Реклама | Авторы | Медиа-кит

Искать

Зарядка на сайте Блога

←

ТРАНСПОРТ  
 №1 (1) / 2005

ТРАНСПОРТ  
 №2 (2) / 2006

ТРАНСПОРТ  
 №3 (3) / 2006

ТРАНСПОРТ  
 №4 (4) / 2006

ТРАНСПОРТ  
 №5 (5) / 2006

ТРАНСПОРТ  
 №6 (6) / 2006

ТРАНСПОРТ  
 №7 (7) / 2006

специальность / 2007

ТРАНСПОРТ  
 №8 (8) / 2007

→