

Демпфирование горизонтальных, поперечных колебаний пути*

В. М. БЕЛЬКОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Знание характера колебательного процесса в горизонтальной плоскости поперек пути позволяет выбрать способ демпфирования для уменьшения снижения прочностных свойств полимерных прокладок, рельсов, шпал и земляного полотна под воздействием горизонтальных вибродинамических нагрузок, возникающих при прохождении подвижного состава. Максимальная горизонтальная деформация полимерных прокладок поперек пути не превышает 10 %, поэтому напряжение и деформацию полимерного материала можно рассчитывать с помощью закона Гука.

В статье проанализированы процессы демпфирования в полимерных прокладках и поверхностных мезослоях колеса и рельса. Впервые систематизированы формулы для расчета размеров и упругих свойств полимерных прокладок и решена задача, когда происходит не чистый сдвиг под влиянием касательных напряжений при одновременном действии вертикальных нагрузок.

Ключевые слова: железнодорожный путь; поперечная устойчивость; мезомеханика контактного взаимодействия; отражение упругих сдвиговых волн; форма; полиуретановые прокладки

Введение. Поперечные колебания вызывают повышенный износ, который определяется состоянием верхнего строения пути и характером силового воздействия подвижного состава на путь [1]. В работах [2–5], посвященных изучению демпфирования полимерными прокладками вертикальных колебаний рельсов, показано, что при прохождении вибрационной волны в слоистой системе шпала – щебень динамические нагрузки поглощаются не из-за рассеяния энергии волны вибрации в полимерных прокладках, а благодаря только отражениям падающих волн на границах раздела железнодорожного полотна. Поглощение энергии волн вибрации в полимерных материалах, щебеночном и песчаном слоях незначительно из-за малой толщины слоев земляного полотна.

Анализ физических и физико-химических свойств полимерных материалов, применяемых в качестве подкладок под рельсы и прокладок на шпалы, продемонстрировал, что номенклатура материалов может быть сведена к двум видам: под рельсы — термоэластопласт жесткостью не ниже 90 ед. по Шору А, а в качестве нашпальных прокладок — полиуретан жесткостью не ниже 85 ед. по Шору А, которые могут

прослужить до замены рельсов [6]. В статье проанализированы процессы демпфирования в полимерных прокладках и поверхностных мезослоях колеса и рельса, рассмотрены вопросы разработки математического аппарата для расчета упругих свойств демпфирующих полимерных прокладок и выбора оптимального полимерного материала для увеличения их жизненного цикла.

Горизонтальные, поперечные колебания пути. Исследование колебательного процесса в балластной призме железнодорожного пути на скоростной линии изложено в статье [7]. В верхнем строении пути были уложены рельсы Р65, сваренные в плети длиной 800 м. Уравнительные пролеты состояли из трех рельсов длиной 25 м со стыковыми накладками. Железобетонные шпалы были уложены с эпюрой 1840 шт./км, использованы скрепления типа КБ, ширина колеи составила 1520 мм. Балластная призма — однослойная. Слой щебня под шпалой толщиной 0,4 м, отсыпан щебнем твердых пород фракциями от 25 до 60 мм. Характеристики поперечной вибрации в балластном слое регистрировали с помощью трех сейсмоприемников СМ-3, позволяющих измерять три составляющие амплитуды колебаний: вертикальную (Z), горизонтальную вдоль оси пути (X) и горизонтальную поперек пути (Y).

Общая характеристика колебательного процесса материала балластной призмы в интервале исследованных скоростей движения поездов (55–125 км/ч) приведена в табл. 1 [7]. Все гармоники колебаний обусловлены силовым и вибрационным воздействием различных частей пассажирских вагонов: колесных пар, подрессоренных и неподрессоренных масс ходовых частей вагонов [8]. Осциллограммы, записанные в сечении подошвы торца шпалы при проходе по участку пассажирских поездов, свидетельствуют о регистрации колебаний с амплитудой в 3 раза меньшей, чем у вертикальной составляющей. Максимальная амплитуда 140 мкм была зарегистрирована при скорости пассажирского поезда до 125 км/ч.

Горизонтальная составляющая колебаний в направлении, перпендикулярном оси пути (рис. 1, кривая 3),

■ E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (В. М. Бельков)

* Статья допущена к публикации в рамках научной дискуссии.

Таблица 1

Общая характеристика колебательного процесса балластной призмы пути [8]

Table 1

General characteristic of the oscillating process of track ballast section [8]

Гармоники колебаний		Составляющие колебательного процесса			Источник возбуждения колебаний
		Вертикальная	Горизонтальная		
			Вдоль пути	Поперек пути	
Низкочастотная	Гц	1,13–1,48	0,9–1,23	0,9–1,25	Силовое нагружение всеми осями тележки
	A ₁ , мкм	160–450	40–113	50–140	
Среднечастотная	Гц	3,00–13,5	–	–	Силовое воздействие каждой колесной пары
	A ₂ , мкм	30–217			
Высокочастотная	Гц	125–250	60–170	50–200	Вибрация неподрессоренных масс ходовых частей подвижного состава
	A ₃ , мкм	0–21	0–11	0–15	

характеризуется несущей частотой и наложенными гармониками. Основная гармоника горизонтальных колебаний пути изменялась в диапазоне частот от 0,9 до 1,25 Гц, амплитуда горизонтальных колебаний — от 50 до 140 мкм при скорости движения пассажирских поездов 55–125 км/ч. Амплитуда наложенных колебаний на основную гармонику в этом диапазоне скоростей составила от 0 до 15 мкм при частоте 50–200 Гц.

Волновые процессы в колесе и рельсе. Волновая картина распространения отраженных продольных и поперечных волн вибрации из-за криволинейности поверхности тел рельсов и шпал не имеет решения в аналитических функциях. Как известно, в случае отражения от свободной шероховатой границы тела часть отраженной продольной волны распространяется вдоль поверхности, быстро затухая по экспоненте, направленной вглубь тела [9, 10], поэтому ее влиянием на объемную деформацию тела можно пренебречь. Свободная поверхность тела в процессе волновой деформации с большой амплитудой является областью объемных изменений и поворотов зерен металла [10]. Характер деформаций на свободной поверхности определяется граничными условиями. Из равенства нулю напряжений на свободной поверхности следует равенство нулю деформаций сдвига. В отличие от деформации сдвига поворот отличен от нуля на свободной поверхности и определяется коэффициентом отражения поперечной волны.

При отражении упругих волн от жесткой границы металл – металл или металл – бетон в случае идеального контакта деформация сдвига и поворот до и после границы равны [11, 12], что указывает на необходимость учета трансляционных и вращательных мод при описании сред с границами раздела и энергии деформирования, определяемой различными степенями свободы.

Мезомеханика поверхности контакта колеса и рельса. Граница контакта колесо – рельс находится в пластическом состоянии, что существенно изменяет

условия отражения и прохождения продольными и поперечными волнами таких аномальных слоев. В работах [13, 14] приведены результаты теоретического и экспериментального исследования локализации пластической деформации твердых тел на различных масштабных уровнях с концентраторами напряжений, которые возникают в поверхностных слоях и на всех внутренних границах раздела. Локализованное течение всех видов может зарождаться и распространяться только в зонах растягивающих нормальных напряжений, где возникают сильноравновесные состояния. По этой причине описать природу локализации пластического течения, как пишут авторы, можно только на основе представления деформируемого твердого тела как сложной многоуровневой системы. Накопление дислокаций в поверхностном слое происходит более интенсивно, чем в объеме металла [15]. При действии вертикальных напряжений, возникающих при наезде тележек на рельсы

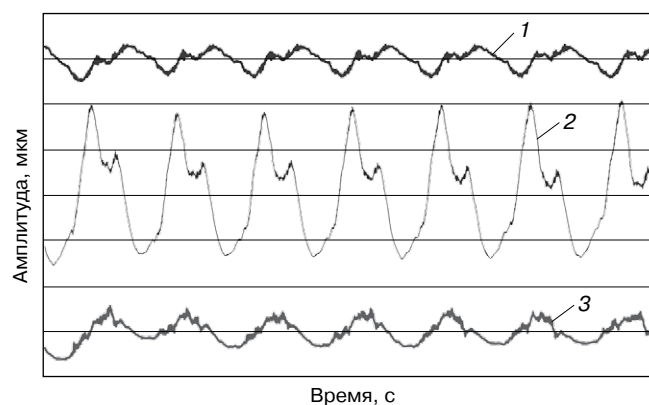


Рис. 1. Осциллограммы колебаний балластного слоя у подошвы торца шпалы при проходе пассажирских вагонов со скоростью 120 км/ч: 1 — горизонтальные колебания вдоль пути; 2 — вертикальные колебания; 3 — горизонтальные колебания поперек пути [8]

Fig. 1. Oscillograms of the ballast layer of the sleeper butt end foundation base when passenger cars move at 120 km/h: 1 — horizontal oscillations along the track; 2 — vertical oscillations; 3 — horizontal oscillations across the track [8]

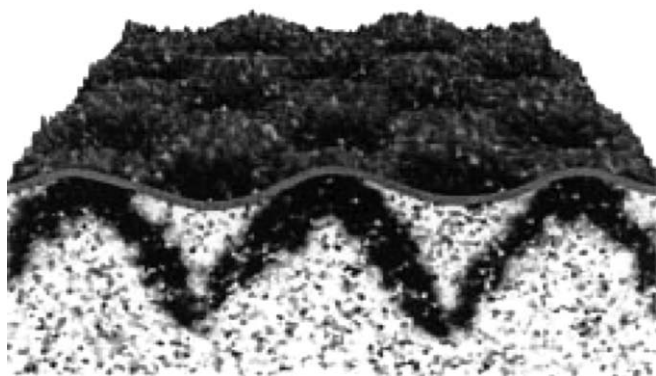


Рис. 2. Деформационный профиль наноструктурированного поверхностного слоя нагруженного твердого тела, полученный трехмерным моделированием при сжатии 0,5 %, и генерация поверхностным слоем в объем металла мезополос неупругой деформации [18]

Fig. 2. Expansion profile of nano-structured surface layer of the loaded solid body obtained by means of 3-D modeling under compression 0.5%, and generation by the surface layer of nonelastic deformation straps into the metal [18]

над шпалами и раздвигающих рельсы на 2...3 мм, неровности на рельсах сглаживаются. При деформировании шейки рельсов появляются крутильные колебания относительно оси вблизи подошвы рельсов. Вследствие касательных напряжений, возникающих при проскальзывании колес вдоль пути и поперек при кручении рельсов в поверхностном слое, наблюдается нестационарное квазипериодическое гофрирование. Эффективная толщина поверхностного слоя может составлять несколько сот микрометров, а структура наноструктурированной границы контакта из-за сильного различия модуля сдвига в поверхностном слое и объеме металла будет представлять собой «шахматное» распределение напряжений и деформаций, подобное изображенному на рис. 2 [16–18].

Наименьшей сдвиговой устойчивостью в нагруженном состоянии характеризуется поверхностный слой твердого тела, который следует рассматривать как особое состояние вещества [13, 19, 20]. Отсутствие у атомов поверхности половины межатомных связей обуславливает специфическую кластерную структуру тонкого поверхностного слоя. Как следствие этого, поверхностный слой при нагрузке на твердые тела более интенсивно теряет сдвиговую устойчивость по сравнению с объемом металла и проявляет специфические свойства пластического течения недислокационной природы [15]. В расчетах коэффициента отражения поперечной волны от поверхностного слоя мы в соответствии с [15–18] примем его модуль сдвига, равным половине модуля сдвига в объеме стали колеса и рельса [10, 11]. Таким образом, активно развиваемая школой академика В.Е. Панина мезомеханика [10–20] дает принципиально новую картину поверхностного слоя контакта двух тел. Концентрирование дислокаций

в поверхностных слоях рельса и колеса увеличивает их объем, пористость и энергию всех атомов, площадь контактной площадки за счет гофрирования поверхностных слоев, формирующихся в результате смещения контактного пятна при движении тележки.

В соответствии с физической мезомеханикой на контакте колеса и рельса модуль упругости поверхностного слоя равен 0,5 величины модуля сдвиговой упругости стали колеса [16–18], а его двойная толщина — 400–600 мкм. Если модуль сдвига поверхностного мезослоя изменяется постепенно от его значений для объема металла на глубине 200–300 мкм до 0,5 модуля сдвиговой упругости стали колеса вблизи поверхности мезослоя, то вертикальная и сдвиговая вибрационные волны отражаться не будут. Однако при эксплуатации рельсов наблюдается явление, когда с поверхности рельсов «сходит» пленка металла, поэтому можно предположить, что адгезионная связь поверхностного мезослоя и объема стали рельсов и колес при эксплуатации постепенно снижается за счет накопления дефектов, и поверхностный мезослой можно считать акустически независимым.

Определение истинного модуля сдвига полимерного материала. В современной конструкции верхнего строения пути очень актуален вопрос замены традиционного эластомера — резины на более совершенный и современный материал — полиуретан. Полиуретан обладает высокими физико-механическими свойствами, большим диапазоном твердости, эластичности, низкой истираемостью, высокой прочностью, высоким сопротивлением раздиру, маслостойкостью, кислотостойкостью, рабочий температурный интервал полиуретана составляет от -35 до $+75$ °С [21–23]. Литьевая технология формования деталей из полиуретана позволяет получать изделия практически любой формы и размеров в отличие от технологии формования резиновых изделий. При формовании полимерного покрытия на поверхности металла обеспечивается высокая адгезия полиуретана к металлу. В силу высокой стоимости резинотехнических изделий полиуретан конкурирует с резиной и в ценовом плане. С помощью демпферов достигается значительное уменьшение динамических усилий и предупреждается возникновение усталостных поломок, то есть увеличивается долговечность рельсов и колес.

При конструировании полиуретановых амортизаторов следует учитывать, что степень деформации полиуретана или термоэластопласта существенно зависит от вида нагружения (табл. 2). Поскольку объем полимерного материала при сжатии или сдвиге практически неизменен (коэффициент Пуассона $\sim 0,5$), истинный модуль сдвига изделия $G_{\text{изд}}$ отличается от табличного значения $G_{\text{сд}}$ из-за изменения площади приложения нагрузки и образования выпуклой поверхности полимера по периметру изделия

Таблица 2

Зависимость модуля сдвига полиуретанов от варианта деформации [29]

Table 2

Dependence of polyurethane shear modulus on the deformation option [29]

Твердость полиуретана по Шору, <i>ShA</i>	Модуль сдвига, МПа	Допустимые касательные напряжения в разных вариантах деформаций, МПа				
		Сдвиг при статической нагрузке	Сдвиг при статическом нагружении с эпизодическими динамическими нагрузками	Сдвиг при постоянных динамических нагрузках	Сдвиг с поворотом	Сдвиг с кручением
65 ± 1	4	2,4	1,8	1,0	1,3	1,1
75 ± 1	5	2,8	2,0	1,0	1,4	1,2
85 ± 1	7	3,5	2,4	1,0	1,5	1,3

и, следовательно, силы поверхностного натяжения с отрицательным знаком. Вследствие этого амортизаторы сдвига (рис. 3) обладают сравнительно небольшой нагрузочной способностью, но большей гибкостью. Для расчета полиуретановых амортизаторов определяют зависимость между величиной нагрузки и соответствующей деформацией амортизатора.

Полиуретановые детали, работающие на сдвиг, могут иметь различную форму. Наиболее часто в качестве подкладок под рельс применяют изделия в виде параллелепипедов с нижней ребристой поверхностью или несковзными отверстиями по всей их площади, которые значительно снижают трение и износ благодаря тому, что полимерный материал вытесняется в полости прокладок. Однако, при этом их прочность на трещинообразование и разрыв снижается [24–29].

Для расчета модуля сдвига изделия из резиноподобных полимеров необходимо учесть влияния боковых поверхностей прокладок-демпферов прямоугольной или иной формы с различной высотой полиуретанового изделия h и поперечными размерами a и b . Перечисленные размеры определяют фактор формы Φ амортизатора — отношение площади нагруженной поверхности к свободной площади. Для деталей прямоугольной формы показатель Φ выражается согласно [26]:

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b)h}, \quad (1)$$

где a и b — стороны основания полиуретановой детали, мм; h — высота детали, мм. По результатам экспериментальных замеров было получено выражение для определения модуля сдвига изделия в зависимости от фактора формы [27]:

$$G_{\text{изд}} = \frac{G_{\text{сд}}}{1 + \frac{1}{28\Phi^2}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{сд}}$ — табличное значение модуля сдвига полиуретана, МПа.

В эксперименте получено небольшое различие в деформативности полиуретанов различной твердости. Мягкие полиуретаны более склонны к поперечному

изгибу, нежели твердые. Это явление отражает коэффициент деформативности при сдвиге [27]:

$$K_{\text{деф.сд}} = 0,5 + 0,0052 ShA, \quad (3)$$

где ShA — значение твердости полимера по Шору.

Окончательно выражение для определения модуля сдвига изделия имеет вид [27]

$$G_{\text{изд}} = \frac{G_{\text{сд}}}{1 + \frac{1}{28\Phi^2}} (0,5 + 0,0052 ShA). \quad (4)$$

При проведении инженерных расчетов полиуретановых деталей на сдвиг зависимость между напряжениями и деформацией можно считать линейной до значительных величин деформации, равных 0,6–0,7. Однако график $G(\gamma)$ показывает незначительное снижение модуля сдвига с увеличением деформации (рис. 4). В инженерных расчетах снижение модуля упругости при сдвиге можно не учитывать. При этом ошибка в определении жесткости деталей в пределах статического сдвига $\gamma = 0,3–0,4$ не превышает 2–5 % для полиуретана твердостью 75–85 ед. по Шору А [27].

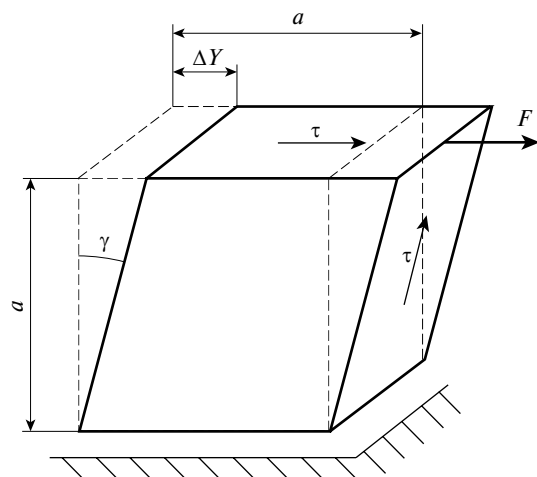


Рис. 3. Схематическое изображение сдвига куба из полимерного материала: a — ребра куба; γ — деформация сдвига; ΔY — сдвиг; τ — напряжение; F — касательная сила сдвига

Fig. 3. Schematic picture of polymeric cube shear: a — cube edges; γ — shear deformation; ΔY — shear; τ — stress; F — tangential shear force

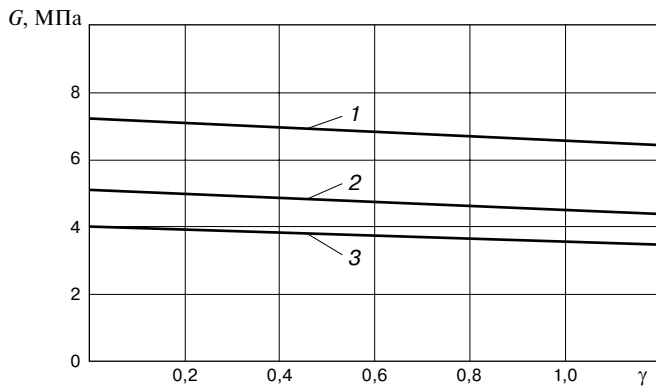


Рис. 4. График модуля сдвига G при увеличении деформации γ [28]:
 1 — при 0 °C; 2 — при 20 °C; 3 — при 80 °C
 Fig. 4. Diagram of shear modulus G when deformation is increased γ [28]:
 1 — at 0 °C; 2 — at 20 °C; 3 — at 80 °C

Если исходить из равномерного распределения касательных напряжений (погрешность $\pm 7\%$) по плоскости сдвига, то связь между напряжением и силой (см. рис. 3) выражается, как известно, следующей формулой:

$$\tau = \frac{F}{S},$$

где F — нагрузка, приложенная к детали, Н; S — площадь плоского сдвига, мм^2 . Деформация ΔY называется абсолютным сдвигом, а отношение $\gamma = \Delta Y/h$ — относительным сдвигом [26]. Как показывают многочисленные исследования, относительный сдвиг и касательное напряжение пропорциональны друг другу и связаны законом Гука, согласно которому $\gamma = \tau/G$. С учетом линейной зависимости $F(\gamma)$ и постоянства модуля сдвига деформацию полиуретановых деталей можно определять на основе зависимости, вытекающей из закона Гука:

$$\Delta Y = \gamma h = \frac{Fh}{G_{\text{изд}} S}, \quad (5)$$

где h — высота прокладки, мм; $G_{\text{изд}}$ — модуль сдвига, МПа; S — площадь поперечного сечения прокладки, мм^2 .

Для прокладок под рельсы из полиуретана сдвиговые колебания происходят на фоне значительных вертикальных статических и динамических и крутильных напряжений, под действием которых пустоты между ребрами или объем несквозных отверстий прокладок заполняются полимерным материалом. Для величин жесткости прокладок 85–90 ед. по Шору А относительный сдвиг γ не превышает 0,4. Относительный объем пустот для ребристой прокладки равен 0,4. Поскольку коэффициент Пуассона полимеров близок к 0,5, объем полимера практически не изменяется при его сжатии, а на границе со шпалой из-за трения площадь контакта полимера изменяется незначительно и ребра приобретают выпуклую форму.

При деформации ребер или отверстий прокладок поверхности искривляются, а капиллярное давление, возникающее при этом, направлено внутрь полимера и частично компенсирует сжимающие напряжения в материале прокладки примерно на 20–25%. В результате пустоты между ребрами заполняются полимером. Для получения более точных значений уменьшения напряжения на шпалу необходимо провести сложный численный эксперимент с учетом шероховатости рельса и шпалы, так как 10–15% энергии вертикальной продольной волны на границах рельс — полимер и полимер — шпала преобразуется в сдвиговые волны, которые рассеиваются на внешней выпуклой поверхности ребер полимерной прокладки.

Горизонтальные динамические нагрузки от подвижного состава генерируют сдвиговые волны в рельсе и прокладке (см. рис. 3). Сдвиговые волны, так же как и вертикальные продольные волны, отражаются от внешней криволинейной поверхности ребер, интерферируют с отраженными вертикальными продольными волнами. При совпадении их по фазе амплитуда суммарной сдвиговой волны в отдельном ребре увеличивается, а при отличии их фаз на 180° — существенно уменьшается. Таким образом, должны наблюдаться биения в средней части ребер. Чем ближе к основанию ребер, тем меньше сдвиговая составляющая вертикальной продольной волны и амплитуда суммарной сдвиговой волны к сдвиговой волне на границе рельс — прокладка из-за уменьшения угла отражения от боковых выпуклых поверхностей ребер.

В табл. 3 представлены акустические характеристики для стали, бетона, резины, полиуретана и термоэластопласта [4, 5, 28]. Значения модуля сдвига и скорости сдвиговой и продольной волн в поверхностном нанослое рельса рассчитаны по данным, приведенным в [10, 11]. Поскольку величины модуля сдвига и скорости поперечных волн в справочниках отсутствуют, они были рассчитаны по известным формулам [4, 5]:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad V = \sqrt{\frac{G}{(1-\beta)\rho}}, \quad \Omega_i = \frac{\rho_{i+1}V_{i+1} - \rho_i V_i}{\rho_{i+1}V_{i+1} + \rho_i V_i}, \quad (6)$$

где G , E — статические модули сдвига и Юнга; μ — коэффициент Пуассона; V — скорость акустической волны в материале; ρ — плотность материала; β — пористость материала; Ω_i — коэффициент отражения сдвиговой вибрационной волны на i -й границе.

Значительно сложнее найти акустические параметры для полимерных прокладок, так как акустические исследования при совместном действии значительной вертикальной нагрузки и сдвиговых динамических колебаний на полимерные материалы для железнодорожного транспорта не проводились. По этой причине обоснуем использование модуля упругости при сжатии для расчета модуля сдвига образца

Таблица 3

Акустические характеристики материалов [5, 6, 30]

Table 3

Acoustic properties of materials [5, 6, 30]

Материал	Модуль Юнга, Па	Скорость продольной волны, м/с	Модуль сдвига, Па	Скорость сдвиговой волны, м/с	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона
Сталь	$20 \cdot 10^{10}$	5100	$7,7 \cdot 10^{10}$	3300	7870	0,29
Бетон	$6,7 \cdot 10^{10}$	5000	$2,9 \cdot 10^{10}$	3020	2700	0,17
Резиновая прокладка	$5 \cdot 10^6$	1040	$1,8 \cdot 10^6$	44	950	0,47
Полиуретан твердостью 85 ед. по Шору А	$22 \cdot 10^6$	1410	$7,2 \cdot 10^6$	78	1180	0,48
Термоэластопласт твердостью 90 ед. по Шору А	$33 \cdot 10^6$	1630	$11 \cdot 10^6$	94	1235	0,48
Поверхностный мезослой между контактирующими колесом и рельсом	$10 \cdot 10^{10}$	4000	$3,8 \cdot 10^{10}$	2500	6300	0,32

прокладки с ребрами, изготовленной из российского материала — полиуретана СКУ-7Л.

Механические свойства полиуретанов можно изменять от высокоэластичных мягких полимеров твердостью от 15 ед. по Шору А до жестких пластиков твердостью 85–90 ед. Сильные межмолекулярные взаимодействия определяют специфику пространственной сетки полиуретанов: будучи образована только физическими поперечными связями в полиуретанах и термоэластопластах с высокой жесткостью, она обеспечивает свойства квазисетчатых материалов, а именно высокую прочность и жесткость.

При сжатии полиуретановой прокладки вертикальными статической и динамической силами ее высота уменьшается на 30–35 %. Ребра прокладок деформируются, уменьшаются по высоте, расширяясь и заполняя промежутки между ними приблизительно на 70–80 %. Статический модуль упругости полиуретана с твердостью 85...90 ед. по Шору А, определенный по стандартной методике [29], равен 15...21 МПа. Согласно [30] у полиуретана твердостью 85 ед. по Шору А объемный модуль упругости $K = 2720$ МПа, а модуль сдвига $G = 7$ МПа. Величина модуля объемного сжатия полиуретана СКУ-7Л с такой же твердостью находится в пределах 4100...4800 МПа при давлении сжатия 200...1000 МПа [31], то есть модуль упругости — величина постоянная. Его значение изменяется при деформировании полиуретана, зависит от контактных условий трения стали по материалу прокладки [32] и разогрева при деформировании. И наконец, полиуретан является аморфным материалом, поэтому силовые параметры его деформирования должны зависеть как от степени, так и от скорости деформации [33]. С точки зрения комплексного учета физико-механических условий деформирования эластичных сред в расчетах силовых характеристик и перемещений в автореферате [34] обобщены весьма интересные результаты для трехмерного напряженно-деформированного состояния деформируемых элементов из эластомерных материалов

в изотермических условиях. Однако реализовать на практике разработанную математическую модель затруднительно, так как в ней отсутствуют простые уравнения и требуется в каждом конкретном случае использовать ЭВМ со специализированными пакетами для конечно-элементного моделирования деформации эластичных материалов.

В целом у полиуретана зависимость напряжения от деформации нелинейная [35, 36] и обычно монотонная. Следовательно, не подчиняющийся закону Гука полиуретан нельзя охарактеризовать одним постоянным значением модуля упругости при сжатии, рассчитываемым как отношение напряжения к деформации. На нелинейной кривой модуль упругости материала можно определить в дифференциальной форме как отношение приращения нагрузки к приращению деформации. В отличие от резины, у которой деформативность не зависит от твердости, полиуретан разной твердости имеет различные величины ужесточения при сжатии. По результатам двухсот замеров деформативности полиуретанов различной твердости получено выражение для коэффициента деформативности при сжатии [36]:

$$K_{\text{дефор}} = 1 + \frac{ShA^{1,17}}{1000}. \quad (7)$$

С учетом изложенного можно определить модуль Юнга полиуретана при сжатии в изделии по следующей формуле [36]:

$$\begin{aligned} E_{\text{изд}} &= E_{\text{сто}} K_{\text{тор}} K_{\text{фор}} K_{\text{дефор}} = \\ &= E_{\text{сто}} K_{\text{тор}} (0,8 + \Phi) \left(1 + \frac{ShA^{1,17}}{1000} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $E_{\text{сто}}$ — начальный модуль упругости полиуретана при сжатии (7 МПа [30]), МПа; $K_{\text{тор}}$ — коэффициент, учитывающий трение на торцах изделия ($K_{\text{тор}} = 1,1$ [36]); Φ — фактор формы для прокладки ЦП-728 составит

$$\Phi = \frac{ab}{2} (a + b) h = 16 \cdot \frac{145}{2} (16 + 145) \cdot 10 = 1,03.$$

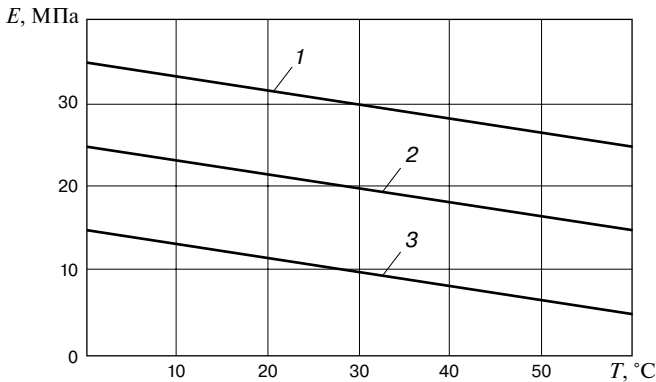


Рис. 5. Зависимость модуля упругости полиуретана от температуры: 1 — полиуретан твердостью 95 ед. по Шору А; 2 — полиуретан 85 ед. по Шору А; 3 — полиуретан 65 ед. по Шору А [34]

Fig. 5. Dependence of polyurethane elasticity modulus on temperature: 1 — polyurethane hardness 95 units ShA; 2 — polyurethane 85 units ShA; 3 — polyurethane 65 units ShA [34]

Для твердости 85 ед. по Шору А и $E_{изд} = 17$ МПа, модуль сдвига

$$G = \frac{E_{изд}}{2} (1 + \mu) = \frac{17}{2} (1 + 0,48) = 5,7 \text{ МПа.}$$

В соответствии с уравнением (4) модуль сдвига прокладки будет равен

$$G_{сд.изд} = \frac{G_{сд}}{1 + \frac{1}{28\Phi^2}} (0,5 + 0,0052 \text{ ShA}) = 5,2 \text{ МПа.} \quad (9)$$

При этом ошибка в определении жесткости деталей не превышает 5 % для полиуретана твердостью 85...90 ед. по Шору А. Модуль Юнга, входящий в уравнение (8), зависит также от температуры (рис. 5) и аппроксимируется выражением

$$E = 35 - 0,16T - (95 - \text{ShA}),$$

где T — температура в градусах Цельсия [33].

При известном диапазоне изменения рабочих температур величину модуля сдвига прокладки можно скорректировать.

При действии вертикальных сил на рельсы возникают раздвигающие деформации (2...3 мм) и крутильные колебания рельсов относительно оси вблизи подошвы рельсов. Максимальное квазистатическое отклонение рельса наблюдается в момент наезда колеса на шпалу. Внешняя часть прокладки под подошвой шпалы относительно рельса должна испытывать наибольшее сжатие, а внутренняя часть прокладки — минимальное. Для резиновой прокладки среднее сжатие составляет ~5 мм. Для размеров шпалы Р50 (высота — 180 мм, ширина подошвы — 150 мм) и отношения плеч (высота рельса — половина ширины подошвы) ~5/7, максимальное сжатие прокладки у конца подошвы без учета деформации шейки рельса

составит ~6,0 мм. В средней части прокладки величина деформации останется прежней — 5,0 мм, а минимальное сжатие внутренней стороны прокладки будет равно 4,0 мм. Расчеты произведены с помощью диаграммы сжатия резиновых прокладок Δl (мм) от сжимающего усилия F (кН) [37]: $F = 0,717 \Delta l^2$. Жесткость прокладки $C_{п} = dF/d\Delta l = 2,15 \cdot 10^{12} \Delta l^2$. Далее из номограммы [36] $C_{п} - E_{п}$ находим модуль упругости комплекта прокладок $E_{п} = 6,7$ МПа. Поскольку модуль упругости резины слабо зависит от сжатия, можно считать модули упругости и сдвига постоянными для малых степеней сжатия Δl . Для сравнения модуль упругости стали E_c рельса Р65 равен $2,06 \cdot 10^5$ МПа [38], поэтому деформацией шейки рельса можно пренебречь.

Зная модуль сдвига прокладки и используя аппарат расчета проходящих и отраженных волн через несколько границ [4, 5], одна из которых — поверхностный слой, можно рассчитать коэффициенты отражения от границ сталь рельса — поверхностный мезослой — сталь колеса, сталь рельса — подкладка из термоэластопласта, термоэластопласт — прокладка из полиуретана, полиуретан — бетон шпалы. Коэффициент демпфирования многослойной системы равен [5]

$$K_d = \prod_{i=1}^n (1 + \Omega_i) = (1 + \Omega_1)(1 + \Omega_2)(1 + \Omega_3)(1 + \Omega_4), \quad (10)$$

где $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ — коэффициенты отражения вибрационной волны на границах колесо — поверхностный нанослой, поверхностный нанослой — рельс, рельс — полимерная прокладка, полимерная прокладка — железобетонная шпала, железобетонная шпала — щебень, а коэффициенты отражения от поверхностного нанослоя на границах колесо — поверхностный нанослой, поверхностный нанослой — рельс равны соответственно $\Omega_1 = -0,25$; $\Omega_2 = +0,25$ (см. третье уравнение системы (6)). Коэффициент отражения для резиновой прокладки от границы 3 равен $\Omega_3 = -0,996$; от границы 4 — $\Omega_4 = +0,98$. Подставляя значения коэффициентов отражения с соответствующими знаками в уравнение (9), находим суммарный коэффициент демпфирования

$$K_d^p = (1 - 0,25)(1 + 0,25)(1 - 0,996)(1 + 0,98) = 0,15.$$

Разделив наибольшую амплитуду низкочастотной гармоники поперечных сдвиговых колебаний (см. табл. 1) на коэффициент демпфирования, найдем начальную амплитуду колебаний рельса в горизонтальной плоскости: $A_{1к} = A_1/K_d^p \approx 1$ мм.

Для полиуретановых прокладок твердостью 85...90 ед. по Шору А в средней ее части величина сжатия прокладки будет меньше в 1,5 раза, чем резиновой, и составлять ~3,3 мм. Максимальное сжатие полиуретановой прокладки с внешней стороны

подошвы шпалы относительно рельса будет равно 4,3 мм, а минимальное сжатие внутренней стороны прокладки — 2,3 мм.

Принимая во внимание все изложенное, можно определить переменный модуль Юнга полиуретановой прокладки при сжатии в изделии по следующей формуле:

$$E_{\text{изд}} = E_{\text{сто}} K_{\text{тор}} K_{\text{фор}} K_{\text{дефор}} = E_{\text{сто}} K_{\text{тор}} \times \left(0,8 + \frac{ab}{2(a+b) \left(h_0 - 4,3 - \frac{2}{b}x \right)} \right) \left(1 + \frac{ShA^{1,17}}{1000} \right), \quad (11)$$

где $E_{\text{сто}}$ — начальный модуль упругости полиуретана при сжатии (7 МПа [30]), МПа; $K_{\text{тор}}$ — коэффициент, учитывающий трение на торцах изделия ($K_{\text{тор}} = 1,1$ [36]), для прокладки ЦП-728 фактор формы для одного ребра равен

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b) \left(h_0 - 4,3 - \frac{2}{b}x \right)} - \frac{16 \cdot 145}{2(16+145) \left(10 - 4,3 - \frac{2}{b}x \right)} = \frac{7,2}{5,7 - \frac{2x}{145}}. \quad (12)$$

Переменная x в уравнении (12) изменяется от $-72,5$ до $+72,5$ мм, а фактор формы — от 1,07 до 1,53. Модуль упругости прокладки $E_{\text{изд}}$ слева направо изменяется при твердости прокладки 85 ед. по Шору А от 20,9 до 16,8 МПа, а модуль сдвига полиуретановой прокладки

$$G = \frac{E_{\text{изд}}}{2} (1 + \mu) = \frac{(20,9 \dots 16,8)}{2} (1 + 0,48) = 7,0 \dots 5,7 \text{ МПа}.$$

В соответствии с уравнением (4) модуль сдвига прокладки будет равен $G_{\text{изд}} = 6,5 \dots 4,8$ МПа. Коэффициенты отражения сдвиговой вибрационной волны на i -й границе Ω_i находят из третьего уравнения системы (6). А так как скорость волны V пропорциональна корню квадратному из модуля сдвига ($V \sim \sqrt{E}$), то максимальное отличие скоростей вибрационной волны на левом и правом концах прокладки от средней не превышает 5%. Именно поэтому эффектом ужесточения полиуретановой прокладки слева и справа от центра кручения рельса в инженерных расчетах можно пренебречь.

Однако для уменьшения раздвигающих напряжений и амплитуды крутильных колебаний рельсов при движении составов полиуретановые прокладки следует изготавливать переменной толщины: с одной стороны прокладка должна быть толще на 2–3 мм и ее толщина должна равномерно снижаться до номинального значения. Прокладки с переменной толщиной будут более эффективно отражать сдвиговые

поперечные вибрационные волны и уменьшать поперечные силы. Для полиуретановых прокладок коэффициенты отражения составят от границы 3 $\Omega_3 = -0,994$, от границы 4 — $\Omega_4 = +0,98$. Суммарный коэффициент демпфирования равен

$$K_{\text{д}}^p = (1 - 0,25)(1 + 0,25)(1 - 0,994)(1 + 0,98) = 0,23.$$

Таким образом, коэффициент демпфирования для полиуретановых прокладок немного ниже, чем для резиновых, но срок их службы в 2,5 раза выше. Кроме того, существует ряд способов, позволяющих повысить коэффициент демпфирования полиуретановых прокладок в 5–10 раз.

Для грузовых составов и при движении в кривых амплитуда поперечных колебаний может превышать амплитуду A_1 для пассажирских поездов (см. табл. 1) в несколько раз. Для таких амплитуд поперечной вибрации может наблюдаться проскальзывание колеса по рельсу и в поперечном направлении, а коэффициент акустической связи колеса и рельса, подошвы рельса и прокладки для сдвиговых колебаний будет меньше 1, что увеличивает отражение вибрационных волн. Проскальзывание колеса и рельса в поперечном направлении сопровождается увеличением суммарного трения качения и шума, повышенным износом рельсов и обода колес.

Выводы. 1. Максимальная горизонтальная деформация полимерных прокладок в направлении поперек оси пути не превышает 10%, поэтому напряжения и деформации полимерного материала можно рассчитывать с помощью закона Гука.

2. Впервые систематизированы инженерные формулы для расчета полимерных прокладок и решена задача, когда происходит не чистый сдвиг от действия касательных напряжений, а сдвиг при одновременном действии вертикальных нагрузок.

3. Активно развиваемая школой академика В. Е. Панина физическая мезомеханика дает принципиально новую картину поверхностного слоя контакта двух тел под значительной нагрузкой. Поверхностный мезослой обладает демпфирующими свойствами. Вибрационные колебания, возникающие в колесах тележки при движении составов по рельсам, частично отражаются от контактной площадки.

4. Процесс проскальзывания колеса и рельса в поперечном направлении наблюдается при значительных поперечных деформациях и сопровождается увеличением суммарного трения качения и шума, повышенным износом рельсов и обода колес.

5. Для уменьшения раздвигающих рельсы деформаций при крутильных колебаниях рельсов полиуретановые прокладки следует изготавливать переменной толщины: с одной стороны прокладка должна быть толще на 2–3 мм и ее толщина должна равномерно снижаться до номинального значения.

Прокладки с переменной толщиной более эффективно отражают сдвиговые поперечные вибрационные волны и уменьшают поперечные силы, срок их службы в 2,5 раза превосходит срок службы резиновых прокладок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельков В. М., Антипов Б. В. Физико-химические основы устойчивости пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 12. С. 21–24.
2. Бельков В. М. Моделирование упруго-вязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 6. С. 334–338. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-334-338>.
3. Бельков В. М. Моделирование упруго-вязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 2 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 1. С. 61–64. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-61-64>.
4. Бельков В. М. Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 3. С. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>.
5. Бельков В. М. Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 2 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 5. С. 312–320. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-312-320>.
6. Бельков В. М. Демпфирование динамических сил материалами, применяемыми при строительстве балластного и безбалластного пути. Полимерные прокладки // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 5. С. 310–320. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-310-320>.
7. Турсунов Х. И. Исследование колебательного процесса в балластной призме железнодорожного пути в условиях Республики Узбекистан [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/45711748-N-i-tursunov-issledovanie-kolebatelnogo-processa-v-ballastnoy-prizme-zheleznodorozhnogo-puti-v-usloviyah-respubliki-uzbekistan.html> (дата обращения: 20.06.2019 г.).
8. Турсунов Х. И. Исследование колебательного процесса в балластной призме железнодорожного пути, засоренной барханскими песками // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. С. 358–389.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости // Теоретическая физика. Т. V–VII. М.: Наука, 1987. 244 с.
10. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. 194 с.
11. Чертова Н. В. О характере деформации на свободной поверхности твердого тела // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. № 22. С. 15–24.
12. Чертова Н. В., Гриняев Ю. В. О характере деформаций на свободной поверхности и жесткой границе раздела при отражении упругих волн // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 5. С. 58–65.
13. Чертова Н. В. Особенности прохождения волн через границы раздела вязкоупругих сред при наличии дефектов // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 2. С. 134–143.
14. Природа локализации пластической деформации твердых тел / В. Е. Панин [и др.] // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 8. С. 62–69.
15. Панин А. В. Масштабные уровни деформации в поверхностных слоях нагруженных твердых тел и тонких пленках: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. Томск: ИФПМ СО РАН, 2006. 37 с.
16. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
17. Панин В. Е. Синергетические принципы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2. № 6. С. 5–23.
18. Моисеенко Д. Д., Жевлаков А. Л., Панин В. Е. «Шахматный» мезоэффект интерфейса в гетерогенных средах в поле внешних воздействий // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 6. С. 5–16.
19. Моисеенко Д. Д., Максимов А. В., Соловьев И. А. Стохастический подход к многоуровневому моделированию возмущений на границах раздела в нагруженном твердом теле // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 2. С. 19–24.
20. Zangwill A. Physics of surfaces. Cambridge: Cambridge Interscience Publishing, 1988. 339 p.
21. Datta J. Synthesis and investigation of glycolysates and obtained polyurethane elastomers // Journal of Elastomers and Plastics. 2010. Vol. 42. Issue 2. P. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1177/0095244309354368>.
22. Maity M., Khatua B. B., Das C. K. Polyblend systems of polyurethane rubber and silicone rubber in the presence of silane grafting agent // Journal of Elastomers and Plastics. 2001. Vol. 33. Issue 3. P. 211–224. DOI: <https://doi.org/10.1106/vu5m-a4ex-4my9-cbr4>.
23. Govorčín Bajsić E., Rek V., Agić A. Thermal degradation of polyurethane elastomers: determination of kinetic parameters // Journal of Elastomers and Plastics. 2003. Vol. 35. Issue 4. P. 311–323. DOI: <https://doi.org/10.1177/009524403034393>.
24. Уточненный расчет напряженно-деформированного состояния колес с массивным упругим ободом методом конечного элемента / Г. В. Аношин [и др.] // Машиностроение и автоматизация производства: межвузовский сб. СПб.: Изд-во СЗПИ, 1999. Вып. 15. С. 35–40.
25. Державец А. Ю., Яковлев С. Н. Предотвращение автоколебаний при финишной обработке металлоэластомерных деталей // Проблемы машиноведения и машиностроения. СПб.: Изд-во СЗПИ, 2000. С. 27–32.
26. Григорьев Е. Т. Расчет и конструирование резиновых амортизаторов. М.: Машгиз, 1960. 164 с.
27. Мазурин В. Л. Определение статической деформации полиуретановых амортизаторов, работающих на сдвиг // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Машиностроение. 2014. Вып. 1. С. 143–148.
28. Энциклопедия полимеров. Т. 3. Полиоксадиазолы — Я / под ред. В. А. Кабанова [и др.]. М., 1977. С. 638–641.
29. Яковлев С. Н. О некоторых физических свойствах конструкционных полиуретанов // Известия СПбГТИ. 2013. № 20. С. 78–80.
30. Райт П., Камминг А. Полиуретановые эластомеры. М.: Химия, 1973. 304 с.
31. Упруго-пластическое самоупрочнение (автофреттирование) толстостенных контейнеров давлением эластичной среды / В. А. Барвинок [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 1999. Т. 1. № 1. С. 157–160.
32. Мазурин В. Л., Яковлев С. Н. Определение жесткости полиуретанового цилиндрического амортизатора при статическом нагружении // Инструмент и технологии. 2011. № 33. С. 22–27.
33. Липатов Ю. С., Керча Ю. Ю., Сергеева Л. М. Структура и свойства полиуретанов. Киев: Наукова думка, 1970. 288 с.
34. Кожушко А. А. Расчет напряженно-деформированного состояния эластомерных элементов виброизоляторов с учетом особенностей их вязкоупругого деформирования: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2012. 18 с.
35. Synthesis and characterization of polyurethane elastomers / H. Zhang, Y. Chen, Y. Zhang, X. Sun, H. Ye, W. Li // Journal of Elastomers & Plastics. 2008. № 40. Issue 2. P. 161–177. DOI: <https://doi.org/10.1177/0095244307085540>.
36. Яковлев С. Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке // Научно-технические

ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 1. С. 137–142.

37. Евтух Е. С. Влияние рельсовых стыков на контактно-усталостную прочность колес железнодорожного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Брянск: Брянский гос. техн. ун-т, 2014. 111 с.

38. Вашук Д. Б., Росин Г. С. Динамические свойства резины // Акустический журнал. 1973. Т. 19. № 2. С. 140–143.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛЬКОВ Владимир Максимович,
д-р физ.-мат. наук, научный консультант НКЦ,
АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 21.02.2019 г., актуализирована 15.07.2019 г., принята к публикации 26.08.2019 г.

Damping of the track horizontal, transversal vibrations*

V. M. BEL'KOV

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Knowledge of the oscillation process nature in horizontal plane across the track allows selecting the way of damping for reducing decrease of strength properties of polymer gaskets, rails, sleepers and earthworks under effect of horizontal vibrodynamic loads occurring during the rolling stock movement. Maximum horizontal deformation of polymer gaskets across the track does not exceed 10% therefore stress and deformation of polymer material can be done using the Hooke's law.

This is the first systematization of formulae for calculation of polymer gaskets, as well as the first resolution of the task when not pure shear takes place under effect of tangential stresses with simultaneous effect of vertical load. Damping coefficient of polyurethane gaskets is the same as for rubber gaskets; however, their service life is 2.5 times longer.

Based on the presented physical mesomechanics it is demonstrated regarding the surface layer of two metal bodies contact under significant load that the surface mesolayer has damping properties, and vibrating oscillations occurring in the truck wheels when rolling stock moves on the rails will be reflected from the contact pad. The process of wheel and rail sliding in transversal direction is accompanied with increase of the total rolling friction and noise, elevated wear and tear of rails and wheel rims. In order to reduce transversal deformations and amplitude of the rails and sleepers torsion oscillations during rolling movement it is proposed to change the shape of polyurethane gaskets. Gaskets with variable thickness will more effectively reflect the shear transversal oscillating waves and reduce transversal forces.

Keywords: railway track; transversal stability; mesomechanics of contact interaction; reflection of elastic shear waves; shape; polyurethane gaskets

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-6-372-382>

REFERENCES

1. Belkov V. M., Antipov B. V. *Fiziko-khimicheskiye osnovy us-toyчивости puti* [The physical and chemical stability of way]. Railway track and facilities, 2013, no. 12, pp. 21–24.
2. Bel'kov V. M. *Modelirovaniye uprugo-vyazkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modelling of elastoviscoplastic properties of the subgrade. Problem statement 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 6, pp. 334–338. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-334-338>.
3. Bel'kov V. M. *Modelirovaniye uprugo-vyazkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 2* [Modelling of elastoviscoplastic properties of the subgrade. Problem statement 2]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 1, pp. 61–64. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-61-64>.

4. Bel'kov V. M. *Modelirovaniye vibrodempfiruyushchikh svoystv uprugovyazkoplasticheskikh sloyev zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 3, pp. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>.

5. Bel'kov V. M. *Modelirovaniye vibrodempfiruyushchikh svoystv uprugovyazkoplasticheskikh sloyev zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 2* [Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 2]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 5, pp. 312–320. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-312-320>.

6. Bel'kov V. M. *Dempfirovaniye dinamicheskikh sil materialami, primenyayemyimi pri stroitel'stve ballastnogo i bezballastnogo puti. Polimernyye prokladki* [Damping of dynamic forces by materials used in the construction of ballast and ballastless tracks. Polymer pads]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 5, pp. 310–320. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-310-320>.

7. Tursunov Kh. I. *Issledovaniye kolebatel'nogo protsessa v ballastnoy prizme zheleznodorozhnogo puti v usloviyakh Respubliki Uzbekistan* [Examination of oscillation process in ballast section of the railway track in the conditions of the Republic of Uzbekistan]. URL: <https://docplayer.ru/45711748-H-i-tursunov-issledovanie-kolebatelnogo-processa-v-ballastnoy-prizme-zheleznodorozhnogo-puti-v-usloviyah-respubliki-uzbekistan.html> (retrieved on 20.06.2019).

8. Tursunov Kh. I. *Issledovaniye kolebatel'nogo protsessa v ballastnoy prizme zheleznodorozhnogo puti, zasorennoy barkhannyami peskami* [Investigation of the oscillatory process in the railroad ballast, clogged sand dunes]. Engineering Journal of Don, 2012, no. 3, pp. 358–389.

9. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Theoretical physics, Vol. V–VII, Moscow, Nauka Publ., 1987, 244 p.

10. Kol'skiy G. *Volny napryazheniya v tverdykh telakh* [Stress waves in solid bodies]. Moscow, Publishing House of foreign literature, 1955, 194 p.

11. Chertova N. V. *O kharaktere deformatsii na svobodnoy poverkhnosti tverdogo tela* [On the nature of deformation on free surface of solid body]. Applied Physics Letters, 2015, Vol. 41, no. 22, pp. 15–24.

12. Chertova N. V., Grinyaev Yu. V. *O kharaktere deformatsiy na svobodnoy poverkhnosti i zhestkoy granitse razdela pri otrazhenii uprugikh voln* [Deformation features on the free surface and rigid interface during elastic wave reflection]. Physical mesomechanics, 2016, Vol. 19, no. 5, pp. 58–65.

13. Chertova N. V. *Osobennosti prokhozheniya voln cherez granitsy razdela vyazkouprugikh sred pri nalichii defektov* [Wave propagation through an interface between viscoelastic media

* The article is published within the frame of scientific discussion.

in the presence of defects]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, Vol. 52, no. 2, pp. 270–278.

14. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D. *Priroda lokalizatsii plasticheskoy deformatsii tverdykh tel i tonkikh plenkakh* [On the nature of plastic strain localization in solids]. *Technical Physics, The Russian Journal of Applied Physics*, 2007, Vol. 52, no. 8, pp. 1024–1030.

15. Panin A.V. *Masshtabnyye urovni deformatsii v poverkhnostnykh sloyakh nagruzhenykh tverdykh tel i tonkikh plenkakh*. Dokt. fiz.-mat. nauk diss. [Large-scale levels of deformation in the surface layers of the loaded solid bodies and thin films. Dr. phys. math. sci. diss.]. Tomsk, ISPSM SB RAS, 2006, 37 p.

16. Alekhin V.P. *Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnykh sloyev materialov* [Physics of strength and plasticity of materials surface layers]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 280 p.

17. Panin V.E. *Sinergeticheskiye printsipy fizicheskoy mezomekhaniki* [Synergetic principles of physical mesomechanics]. *Physical mesomechanics*, 1999, Vol. 2, no. 6, pp. 5–23.

18. Moiseenko D.D., Zhelvakov A.L., Panin V.E. *“Shakhmatnyy” mezoefekt interfeysa v geterogennykh sredakh v pole vneshnikh vozdeystviy* [Chessboard-like mesoeffect of the interface in heterogeneous media in the fields of external actions]. *Physical mesomechanics*, 2006, Vol. 9, Issue 6, pp. 5–16.

19. Moiseenko D.D., Maksimov A.V., Solovyev I.A. *Stokhasticheskiy podkhod k mnogourovnevomu modelirovaniyu voz-mushcheniy na granitsakh razdela v nagruzhenom tverdom tele* [Stochastic approach to the multilevel simulation of disturbances on the interfaces in a loaded solid]. *Physical mesomechanics*, 2004, Vol. 7, Issue 2, pp. 19–24.

20. Zangwill A. *Physics of surfaces*. Cambridge, Cambridge Inter-science Publ., 1988, 339 p.

21. Datta J. *Synthesis and investigation of glycolysates and obtained polyurethane elastomers*. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2010, Vol. 42, Issue 2, pp. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1177/0095244309354368>.

22. Maity M., Khatua B.B., Das C.K. *Polyblend systems of polyurethane rubber and silicone rubber in the presence of silane grafting agent*. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2001, Vol. 33, Issue 3, pp. 211–224. DOI: <https://doi.org/10.1106/vu5m-a4ex-4my9-cbr4>.

23. Govorčin Bajsic E., Rek V., Agić A. *Thermal degradation of polyurethane elastomers: determination of kinetic parameters*. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2003, Vol. 35, Issue 4, pp. 311–323. DOI: <https://doi.org/10.1177/009524403034393>.

24. Antoshin G.V., Derzhavets Yu.A., Sivchikov R.V., Yakovlev R.N. *Utochnennyi raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya koles s massivnym uprugim obodom metodom konechnogo elementa* [Specified calculation of the stress-strain state of wheels with massive elastic rim using the finite element method]. Machine-building and automation of production, Inter-university collection. Saint Petersburg, NWPI, 1999, Issue 15, pp. 35–40.

25. Derzhavets A. Yu., Yakovlev S.N. *Predotvrashcheniye avtokolebaniy pri finishnoy obrabotke metalloelastomernykh detaley* [Prevention of self-oscillations at final processing of the metal-in-elastomer parts]. Machine-building and automation of production, Inter-university collection. Saint Petersburg, NWPI, 2000, pp. 27–32.

26. Grigoryev E.T. *Raschet i konstruirovaniye rezinovykh amortizatorov* [Calculation and design of rubber shock-absorbers]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960, 164 p.

27. Mazurin V.L. *Opredeleniye staticheskoy deformatsii poliuretanovykh amortizatorov, rabotayushchikh na sdvig* [Determination of static deformation of polyurethane shock-absorbers working in shear]. *Scientific and technical bulletin of Saint Petersburg State Technical University, Machine-building*, 2014, Issue 1, pp. 143–148.

28. *Entsiklopediya polimerov. Polioksadiazoly — Ya* [Encyclopedia of polymers. Polyoxadiazoles-I]. Ed. by V.A. Kabanov. Moscow, Soviet encyclopedia Publ., 1977, Vol. 3, pp. 638–641.

29. Yakovlev S.N. *O nekotorykh fizicheskikh svoystvakh konstruktivnykh poliuretanov* [Some physical properties of constructive polyurethanes]. *Bull. of SPbSTI (TU)*, 2013, no. 20, pp. 78–80.

30. Right P., Cumming A. *Poliuretanovyye elastomery* [Polyurethane elastomers]. Moscow, Khimiya Publ., 1973, 304 p.

31. Barvinok V.A., Fedotov Yu.V., Rodin N.P., Kirilin A.N. *Uprugo-plasticheskoye samouprochneniye (avtofretirovaniye) tolstostennykh konteynerov davleniyem elastichnoy sredy* [Elastoplastic self-reinforcement (autofretting) of thick-walled containers by pressure of elastic agen]. *Izvestia RAS SamSC*, 1999, Vol. 1, no. 1, pp. 157–160.

32. Mazurin V.L., Yakovlev R.N. *Opredeleniye zhestkosti poliuretanovogo tsilindricheskogo amortizatora pri staticheskoy nagruzheni* [Determination of hardness of polyurethane cylindrical shock-absorber at static loading]. *Instrument i tekhnologii*, 2011, no. 33, pp. 22–27.

33. Lipatov Yu.R., Kercha Yu.Yu., Sergeeva L.M. *Struktura i svoystva poliuretanov* [Structure and properties of polyurethane]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1970, 288 p.

34. Kozhushko A.A. *Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elastomernykh elementov vibrozolyatorov s uchetom osobennostey ikh vyazkouprugogo deformirovaniya*. Kand. tekhn. nauk diss. [Calculation of the stress-strain state of elastomeric elements of shock-absorbers with regard to the features of their visco-elastic deforming]. Cand. tech. sci. diss.]. Omsk, Omsk State Technical University, 2012, 18 p.

35. Zhang H., Chen Y., Zhang Y., Sun X., Ye H., Li W. *Synthesis and characterization of polyurethane elastomers*. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2008, Vol. 40, no. 2, pp. 161–177. DOI: <https://doi.org/10.1177/0095244307085540>.

36. Yakovlev S.N. *Raschet poliuretanovykh detaley, rabotayushchikh na szhatiye pri staticheskoy nagruzhke* [Calculation of polyurethane details which are working on shrinkage under static load]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2014, no. 1, pp. 137–142.

37. Evtukh E.R. *Vliyaniye rel'sovykh stykov na kontaktno-ustalostnuyu prochnost' koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sastava*. Kand. tekhn. nauk diss. [Effect of rails joints on the contact-fatigue strength of wheels of the railway rolling stock. Cand. tech. sci. diss.]. Bryansk, Bryansk State Technical University, 2014, 111 p.

38. Vashchuk D.B., Rosin G.R. *Dinamicheskiye svoystva reziny* [Dynamic properties of rubber]. *Akusticheskij Zhurnal*, 1973, Vol. 19, no. 2, pp. 140–143.

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir M. BEL'KOV,
Dr. Sci. (Phys. and Math.),
Scientific Consultant of NKC, JSC “VNIIZhT”

Received 21.02.2019

Revised 15.07.2019

Accepted 26.08.2019

E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (V. M. Bel'kov)