

Демпфирование динамических сил материалами, применяемыми при строительстве балластного и безбалластного пути. Полимерные прокладки

В. М. БЕЛЬКОВ

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

Аннотация. В статье проведены расчеты коэффициентов демпфирования полимерных прокладок, выбраны для них материалы, которые обеспечивают минимальные напряжения на грунты под железнодорожным полотном и исключают его просадки в широком рабочем диапазоне температур и частот. На базе теории волновых процессов обосновано применение дополнительной металлической пластины между подкладкой под рельс и прокладкой на шпалу, которая позволяет благодаря отражению в противофазе на границе «металл рельса — полимер» снизить амплитуду вибрационной волны в рельсе и колесе в шесть раз, а при отражении вибрационной волны в сегменте «металлическая пластина — прокладка — бетонная шпала» уменьшает амплитуду волны еще в три раза. Для российского резко континентального климата следует в качестве подкладок под рельсы использовать термоэластопласты, а на шпалы — полиуретан. Для повышения коэффициента демпфирования между подкладкой и прокладкой нужно установить шероховатую алюминиевую пластину, на которую следует напылить полимер. Такая составная прокладка может «работать» и при низких температурах от -60°C , и при высоких до $+80^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: упруговязкопластические свойства материалов; демпфирование; вертикальные вибрационные волны; слоистые полимерные материалы; сравнительный анализ

Введение. В ряде работ [1, 2, 3, 4, 5], посвященных проблеме демпфирования вибраций, действующих на земляное полотно от проходящих поездов, на основе теории волновых процессов получены выражения, позволяющие оценивать величины смещений, деформаций и напряжений в слоистых системах и на границах слоев. С помощью простейшей линейной волновой модели показано [4, 5], что поглощение динамических нагрузок происходит не из-за рассеяния энергии волны вибрации в материале вязкоупругопластической полимерной прокладки, а благодаря только отражениям падающих волн на границах раздела слоистой системы — железнодорожного полотна. Поглощение энергии волны вибрации несущественное. Поэтому если выбрать материал твердостью 85–90 ShA, то такая прокладка прослужит до замены рельса, скорость волны в прокладке увеличится в 1,7 раза, а коэффициент отражения уменьшится на 0,04 и составит 0,92.

Наилучшие демпфирующие свойства и более низкую стоимость имеют конструкции пути на щебеночном балласте по сравнению с железобетонным основанием.

Разработанный аппарат определения степени демпфирования напряжений в конструкции нижнего и верхнего строения пути [2, 3, 4, 5] служит основой для подбора новых, более эффективных демпфирующих материалов и типовой конструкции нижнего строения пути в зависимости от геологических, климатических условий и сезонного уровня грунтовых вод.

Волновая модель учитывает не только прямое распространение напряжений от приложенной нагрузки, но и отражение волн от поверхности контакта объектов с разными физическими свойствами, что дает возможность аналитически получить адекватный инструмент формирования упругой динамической деформации.

В статье Д. М. Кургана и И. О. Бондаренко [6] приведено моделирование жизненного цикла работы элементов железнодорожного пути для исследования развития процессов деформативности как основы создания нормативной базы работы пути при условии обеспечения надежности железных дорог. Для достижения цели использованы основы трехмерной теории распространения волнового процесса при описании взаимодействия пути и подвижного состава. Решения подобных задач с учетом физической неоднозначности, крайней сложности записи граничных условий для трехмерной картины распределения напряжений, износа и загрязнения поверхностей качения и наклепа и, следовательно, изменения акустических свойств материалов колес и рельсов на сегодняшний день найти невозможно.

В настоящей статье проведены расчеты коэффициентов демпфирования полимерных прокладок, выбраны материалы для прокладок, которые обеспечивают минимальные напряжения на грунты под железнодорожным полотном и исключают просадки в широком рабочем диапазоне температур и частот.

Постановка задачи. Передача вибрационной волны или статических и динамических сил, которые возникают от проходящего поезда и действуют вертикально по оси Z от подошвы рельса через прокладки на шпалу — крайне сложный процесс. Волна напряжений сжатия

на границе контакта рельса и прокладки в основном отражается от поверхностных слоев прокладки, так как акустическое сопротивление прокладки значительно меньше акустического сопротивления стали рельса [5], и в противофазе складывается с набегающей волной. В результате суммарная амплитуда вибрационной волны в рельсе и прокладке для частотного диапазона 4–250 Гц уменьшается более чем в пять раз [5]. Поэтому прокладка между шпалой и щебнем — необходимое технологическое решение для продления срока службы шпал, увеличения акустической площади контакта, значительного уменьшения амплитуды и деформации продольной волны. Величина коэффициента отражения Ω_1 (сталь/резина) с учетом нагрузки на прокладку и данных табл. 1 [5] равна

$$\Omega_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = -0,85,$$

где Z_1 и Z_2 — импеданс стали и полимерной прокладки соответственно; ρ_1 и ρ_2 — плотности стали и полимера соответственно; v_1 , v_2 — скорости распространения волны в контактирующих средах. Величина Ω_2 (резина/бетон) равна [5] $\Omega_2 \approx 0,8$. Амплитуды волн вибрации за счет отражения в противофазе на границе «металл — полимер» [5] уменьшится на величину Ω_1 и составит $(1 - \Omega_1)A = 0,15A$, где A — амплитуда первоначальной волны. Таким образом, в колесе и рельсе возникает стоячая волна амплитудой $0,15A$. Прошедшая волна в резиновой подкладке с амплитудой $0,15A$ достигает за микросекунды границы «металлическая пластина — резиновая подкладка» и проходит ее с амплитудой $0,15A(1 + \Omega_1) = 0,17A$. Амплитуда падающей волны на границе «металлическая пластина — резиновая прокладка» будет равна $0,17A(1 - \Omega_1) = 0,026A$. Падающая волна в резиновой прокладке амплитудой $0,026A$, отражаясь от бетонной шпалы (коэффициент отражения равен $-0,8$) в противофазе, уменьшается до величины $0,026A(1 - 0,8) = 0,0052A$. Следовательно, если между подкладкой под рельс и прокладкой на шпалу установить дополнительную металлическую пластину, то результирующая амплитуда волны уменьшится, а коэффициент демпфирования будет приблизительно равен 19. Данный расчет носит приближенный характер, так как не учитывает неравномерность динамических напряжений в подошве рельса, подкладке и металлической пластине, и он применим для частотного диапазона 1–50 Гц. Для частот более 50 Гц модуль упругости резиновой прокладки выше и, следовательно, больше скорость волны и ниже коэффициент демпфирования, для частот более 250 Гц явление демпфирования практически отсутствует.

Статические и динамические нагрузки на шпалу. В интервалах эксплуатационных скоростей движения грузовых составов от 30 до 120 км/ч и высокоско-

Таблица 1

Значения первой гармоники f_1 в разложении Фурье для различных скоростей движения состава

Table 1

Values of the first harmonic f_1 in the Fourier decomposition for different train speeds

Частота первой гармоники f_1 , Гц	0,65	2,0	4,1	6,5
Скорость движения поезда, км/ч, м/с	40/11,1	120/33,3	25/69,4	400/111,1

ростных поездов от 260 до 400 км/ч спектр вибраций, передаваемых грунту, сосредоточен в частотном диапазоне 4–10 кГц. Как показано в работе [4], благодаря компенсации поперечных волн, генерируемых по периметру шпал, в объеме бетонной плиты или щебня между шпалами поперечные волны практически скомпенсированы. Поэтому процессы распространения продольных волн вглубь земляного полотна от каждой шпалы в шпальной решетке будут подобными и каждая шпала может являться реперным элементом при изучении воздействия на нижнее строение пути.

До настоящего времени при математическом моделировании сильных сейсмических волн использовалась линейно-упругая модель, изложенная в классической монографии К. Аки и П. Ричардса [7]. В докторской диссертации В. В. Гурьянова [8] на основе общей математической модели механики упругосжимаемой линейной вязкоупругой трехмерной сплошной среды выделена общая математическая модель движения сейсмических волн во флюидонасыщенном грунте с доминированием твердого скелета при волновом воздействии на него. Используя метод разделения переменных для дифференциальных уравнений этой модели, автор получил уравнения в разделенных переменных для скалярного потенциала объемных волн, из которого следует, что все особенности распространения волны в вязкоупругой сплошной среде сосредоточены во временном уравнении и не зависят от пространственных переменных. Поэтому можно ограничиться рассмотрением только плоских волн.

Моделирование нагрузки на шпалу. В момент прохождения центральной части вагона над реперной шпалой нагрузка на нее будет малой благодаря компенсации силы соседними шпалами, а затем при смещении вагона реперная шпала начинает нагружаться. На кривой нагрузки реперной шпалы будут наблюдаться 4 локальных максимума, соответствующих прохождению двух осей второй тележки предыдущего вагона и двух осей первой тележки следующего вагона. Причем амплитуды третьего и четвертого максимумов будут выше первого и второго. Для шпал с координатами 0 и 0,5 м вертикальные перемещения от грузового поезда отличаются более чем в три раза и равны 6 и 2 мм соответственно [9]. Остальные шпалы

являются менее нагруженными с силой реакции опоры приблизительно 15%. Суммарная сила складывается из статической нагрузки на колесо и переменных дополнительных сил инерции от колебаний экипажа и дефектов колес и рельсов [9, 10, 11, 12, 13, 14]:

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{р}} + P_{\text{нп}} + P_{\text{инк}} + P_{\text{ннк}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ст}}$, $P_{\text{р}}$, $P_{\text{нп}}$, $P_{\text{инк}}$, $P_{\text{ннк}}$ — составляющие от веса экипажа, колебаний кузова на рессорах, дефектов рельсов, сил инерции необрессоренных масс при изолированных неровностях на пути и колесах, а также непрерывных неровностях на колесах соответственно. Статическая нагрузка $P_{\text{ст}}$ состоит из постоянной составляющей на ось [9], равной $0,15P_{\text{н}}g$, где $P_{\text{н}}$ — нагрузка на ось, равная $23,5 \cdot 10^3$ кг, и переменной величины $P_{\text{пер}}$, возникающей при наезде колес на реперную шпалу, а остальные являются систематическими или случайными величинами. Максимум кривой нагрузки на реперную шпалу при наезде первой оси тележки будет меньше, чем на следующие три оси из-за просадки и упрочнения нижнего строения пути [9]. Кривую $P_{\text{пер}}$ можно приближенно аппроксимировать периодическими трапецеидальными импульсами с длиной верхнего основания $T_0 = 2(L_{\text{б}} + L_{\text{ц}} + L_{\text{тв}})/v = 6,58$ м/в (с) и периодом, равным $T = (L_{\text{б}} + L_{\text{ц}})/v = 16,97$ м/в (с), $T_1 = (T - 2T_0) = 3,81$ м/в (с), где $L_{\text{б}}$ — длина вагона; $L_{\text{ц}}$ — длина автосцепки вагонов; $L_{\text{б}}$ — база тележки; $L_{\text{тв}}$ — расстояние от оси тележки до конца вагона; v — скорость движения поезда. Причем средняя статическая нагрузка от трапецеидального импульса будет больше на 15%, чем реально наблюдаемая. Разложим импульс вертикальной нагрузки на шпалу $F_{\text{пер}}$ в ряд Фурье и в результате получим [15]

$$\begin{aligned} F_{\text{пер}}(t) &= P_{\text{н}}g \frac{T_0 + T_1}{2T} \left\{ 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4T^2}{\pi^2 i^2 (T_0^2 - T_1^2)} \times \right. \\ &\times \sin \left[\frac{\pi i (T_0 - T_1)}{2T} \right] \sin \left[\frac{\pi i (T_0 + T_1)}{2T} \right] \cos i\omega t \Big\} = \\ &= 0,52 P_{\text{н}}g \left\{ 1 + 0,4 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \sin 0,26i \sin 0,96i \cos i\omega t \right\} = \\ &= 0,52 P_{\text{ст}}g (1 + 0,21 \cos \omega t + 0,12 \cos 2\omega t + 0,02 \cos 3\omega t - \\ &- 0,026 \cos 4\omega t - 0,038 \cos 5\omega t - \dots), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi/T$ или $f_1 = T^{-1} = \frac{v}{16,97 \text{ м}}, \text{ с}^{-1}$.

В табл. 1 приведены значения первой гармоники f_1 в разложении Фурье для различных скоростей движения состава.

Переменные дополнительные силы инерции возникают от колебаний экипажа на рессорах и дефектов колес и рельсов, инерции необрессоренных масс при изолированных неровностях на пути и колесах, а так-

же непрерывных неровностях на колесах. Неровности на поверхности катания колес бывают двух видов. Наиболее распространенными являются так называемые непрерывные неровности на колесе, когда из-за неравномерности износа рельса искажается первоначальная форма колеса по всей поверхности катания. Но в современных условиях все чаще встречаются изолированные плавные неровности колесных пар из-за повышенного износа колеса вследствие торможений и блокировки колесной пары подвижного состава — ползуны, навары и т. п. Движение колеса с неровностями на поверхности катания рельса приводит к вертикальным колебаниям колеса, в результате чего в колесе возникают силы инерции, являющиеся дополнительной нагрузкой на рельс. При отрыве колеса возникают удары, оказывающие дополнительное воздействие на рельс. Такие удары могут вызывать даже изломы рельсов, особенно в зимние месяцы, когда возрастает хрупкость рельсовой стали. Наибольший импульс силы $P_{\text{нп}}$ будет наблюдаться при резонансе, когда частоты возмущающей силы и колебаний колеса близки. Вид импульса силы близок к синусоидальной кривой с длительностью $t_{\text{им}} \sim 7$ мс [9]. На рис. 1 приведены одновременно сигналы от прохождения бездефектного (поз. 1) и дефектного (поз. 2) колеса.

Измерения, выполненные Е. С. Ашпизом в 1998–1999 гг. на участке линии Санкт-Петербург — Москва, показали, что ударное воздействие на путь с относительно близкими интервалами возникает от 16,5%, проследовавших колесных пар грузовых вагонов [14, 15]. В работе [9] установлено, что все колесные пары, вызывающие динамическое воздействие свыше 280 кН, содержат дефекты поверхности катания, размеры которых близки к браковочному уровню. Динамическая сила от колеса на рельс для 90% колесных пар не превышает 200 кН. Локальный максимум амплитудного распределения динамической силы в области от 270 до 300 кН содержит около 9% колесных пар. Упругопластические свойства подрельсового основания оказывают существенное влияние на результаты измерения вертикальных деформаций над шпалами. Поэтому для первой оси тележки при наезде на реперную шпалу характерным является значительный свободный ход и сильная зависимость силы реакции от осевой нагрузки от подвижного состава. Для второго колеса реакция от шпалы выше из-за повышения жесткости нижнего строения пути. Для грузового поезда с количеством вагонов $n = 70$ находим средний период колоколообразных импульсов T_{yb}

$$T_{\text{yb}} \approx \frac{n(L_{\text{б}} + L_{\text{ц}})100\%}{16,5\%n4v} = \frac{25,7}{v}, \text{ с}, \quad (3)$$

т. е. предполагаем, что дефекты расположены приблизительно равномерно вдоль состава, так как просадку

пути определяет амплитуда воздействия и производная от напряжения [4], воздействующая на реперную шпалу. Если предположить, что импульсы ударного воздействия распределены во времени случайным образом, то с учетом времен запаздывания в интегралах Фурье для каждого импульса и их суммирования с положительными и отрицательными амплитудами получим не сплошной частотный спектр, а линейчатый. Поэтому мы можем разложить группу коротких колоколообразных импульсов длительностью $t_{им} = 7$ мс в ряд Фурье для наихудшего случая, когда удар приходится на реперную шпалу, в результате получим [13]

$$F_{ув}(t) = \frac{t_{им}}{T_{ув}} F_{ув \max} \left\{ \frac{2}{\pi} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4T_{ув}^2}{\pi^2 (4i^2 t_{им}^2 - T_{ув}^2)} \times \right. \\ \left. \times \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{2it_{им}}{T_{ув}} - 1 \right) \right] \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{2it_{им}}{T_{ув}} + 1 \right) \right] \cos \frac{2\pi it}{T_{ув}} \right\} = \\ = 54,5v \left\{ 0,64 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{0,1}{(2,9 \cdot 10^{-7} i^2 v^2 - 1)} \times \right. \\ \left. \times \sin \left[\frac{\pi}{2} (5 \cdot 10^{-4} iv - 1) \right] \sin \left[\frac{\pi}{2} (5 \cdot 10^{-4} iv + 1) \right] \cos 0,24ivt \right\}. \quad (4)$$

В разложении (4) амплитуда перед $\cos 0,24ivt$, начиная с $i > 15$, уменьшается, и ряд быстро сходится.

Постоянная составляющая в разложении для смещения рельса при воздействии динамической ударной силы в правой части уравнения (3) значительно меньше постоянной составляющей в разложении для смещения рельса от действия силы $F_{ст}(t)$ даже для скорости $v = 111,1$ м/с, так как периодические импульсы динамической силы имеют большую скважность:

$$q = T_{ув} / t_{им} = 112.$$

Произведение $\sin \left[\frac{\pi}{2} (5 \cdot 10^{-4} iv - 1) \right] \sin \left[\frac{\pi}{2} (5 \cdot 10^{-4} iv + 1) \right] = -\sin^2(2,5\pi 10^{-4} iv)$, а для скорости $v = 33,3$ м/с и $i = 15$ знаменатель $(2,9 \cdot 10^{-7} i^2 v^2 - 1) \cong -1$. Значение $-\sin^2(2,5\pi 10^{-4} iv)$ при $v = 33,3$ м/с и $i = 15$ равно $-0,146$, для $i = 1$ квадрат синуса будет равен $6,8 \cdot 10^{-4}$. Отсюда находим максимальное значение $F_{ув}^{\max}(t) = 1,15(1 + 0,015 \cos 0,24ivt)$ в кН, которое на три порядка меньше переменной составляющей в уравнении (1). Поэтому выражение для суммарной силы, действующей на прокладки и шпалу, $F_{сум}(t)$, можно упростить:

$$F_{сум}(t) = 0,67 P_{н} g + 0,21 P_{н} g \sum_{i=1}^5 \times \\ \times \frac{1}{i^2} \sin 0,26i \sin 0,96i \cos i\omega t. \quad (5)$$

Силу, возникающую при ударах на стыках рельсов, мы не рассматриваем, так как идет постепенный пере-

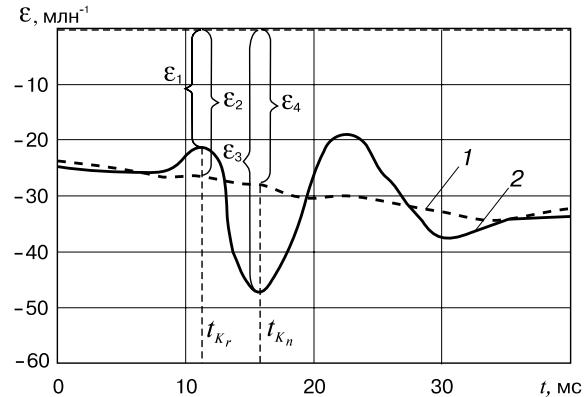


Рис. 1. График зависимости симметричных деформаций колеса без дефекта (1) и с дефектом (2) от времени [9]: ε_1 — минимальная амплитуда в момент времени $t_{кн}$, связанная с разгрузкой рельса при проезде дефектного колеса; ε_2 — амплитуда в момент времени $t_{кр}$, связанная с силовым воздействием бездефектного колеса на рельс; ε_3 — максимальная амплитуда в момент времени $t_{кн}$, связанная с воздействием дефектного колеса на рельс; ε_4 — амплитуда деформаций при движении бездефектного колеса в момент времени $t_{кн}$

Fig. 1. Diagram of symmetric deformations of the wheel without defect (1) and with defect (2) through time [9]:

ε_1 — minimum amplitude at time moment $t_{кн}$, associated with the unloading of the rail when passing a defective wheel; ε_2 — amplitude at time moment $t_{кр}$, associated with the force action without a defective wheel on the rail; ε_3 — maximum amplitude at time moment $t_{кн}$, associated with the action of a defective wheel on the rail; ε_4 — amplitude of deformations when the wheel without defects moves at the moment of time $t_{кн}$

вод инфраструктуры на бесстыковой путь. Переменная часть $F_{сум}(t)$ воздействует на щебеночную призму на фоне квазипостоянной силы $0,67 P_{н} g$ (5).

Наиболее неблагоприятным случаем является совпадение растягивающих напряжений при ударах в головке рельса с зоной, в которой имеются внутренние дефекты металла. Но, как следует из вышеприведенных уравнений (1)–(5), для воздействий в виде коротких импульсов и высокой их скважности благодаря инерционности земляного полотна со шпалами происходит «размазывание» энергии импульса во времени. Поэтому их влияние на поведение на нижнее строение пути крайне незначительно. Но в системе «колесо — рельс» в таких ситуациях возможны изломы или повреждения рельса.

Экспериментальные значения деформации прокладок получены в [16] в диапазоне сил от нулевого значения до максимального сжимающего усилия — 200 кН. Полученная диаграмма сжатия комплекта резиновых прокладок представлена на рис. 2 [16]. Кривая осадки от сжимающего усилия аппроксимируется степенной зависимостью $\Delta z = 1,12 \sqrt[3]{F}$, где F — сила нагрузки в Н, Δz — осадка или смещение в метрах. Для определения жесткости комплекта прокладок связь между силой и осадкой представлена в работе [16] в виде

$$F = 0,717 \cdot 10^{12} \Delta z^3.$$

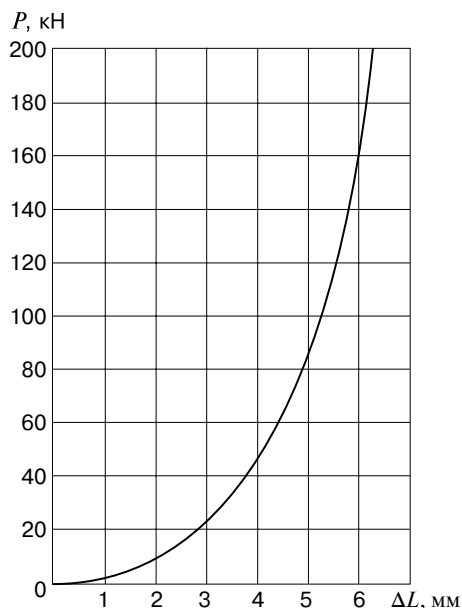


Рис. 2. Диаграмма сжатия комплекта резиновых прокладок рельсового крепления [16]:

P — нагрузка в кН; ΔL — сжатие прокладки в мм

Fig. 2. Compression diagram of a set of rubber pads for rail fastening [16]:

P — load in kN; ΔL — pad compression in mm

Жесткость равна производной от силы по осадке $C_n = dF / d\Delta z = 2,15 \cdot 10^{12} \Delta z^2$. При нагрузке на комплект прокладок $P = 110$ кН осадка равна $5,2 \cdot 10^{-3}$ м, а жесткость $C_n = 5,81 \cdot 10^7$ Н/м. Отсюда из номограммы $C_n - E_n$ (рис. 2) находим модуль упругости комплекта прокладок $E_n = 6,8$ МПа. Для сравнения модуль упругости стали E_c рельса Р65 равен $2,06 \cdot 10^5$ МПа [17]. Нормальное к плоскости пути напряжение, действующее на полимерную прокладку, с учетом (4) будет равно

$$\sigma_{ct}^n = \frac{0,67 P_n g}{2 a_p a_n} = \frac{0,67 \cdot 23,5 \cdot 10^3 \cdot 9,8}{2 \cdot 0,15 \cdot 0,182} = 2,83 \text{ МПа}, \quad (6)$$

где a_p — ширина подошвы рельса (0,15 м); a_n — ширина прокладки (0,182 м). При 50% площади контакта шпалы и щебня среднее напряжение, действующее на границе «шпала — щебень», было бы равно

$$\sigma_{ct}^w \approx \frac{a_p a_n}{0,5 S_w} \sigma_{ct}^n \approx \frac{0,15 \cdot 0,182 \cdot 2,83}{0,5 \cdot 0,8165} = 0,38 \text{ МПа}, \quad (7)$$

где S_w — площадь шпалы, m^2 .

В действительности средние контактные напряжения на границе «железобетонная шпала — щебень» фракцией 25–60 мм в начальный период достигают величин 1500 МПа, в нижних слоях щебеночной призмы — до 700 МПа [18]. Поэтому коэффициент акустического контакта между шпалой и щебнем крайне мал. Из-за неравномерной опоры шпал на щебеночный балласт и поворота шпал фактические контакт-

ные напряжения возрастают в 4–6 раз и более. Это ускоряет процесс раскола зерен щебня в местах их контактов и приводит к неравномерным остаточным деформациям. По мере увеличения площади контакта и уменьшения пустот увеличиваются силы трения между зернами щебня, обеспечивая более равномерное распределение вертикальной нагрузки. Экспериментами и теоретическими исследованиями показано, что в случаях применения рельсов массой 60–65 кг/м выравнивание напряжений на основной площадке земляного полотна происходит при толщине балласта 55–60 см с эпюрой шпал 2000 шт./км и 65–70 см с эпюрой шпал 1840 шт./км [19, 20, 21]. По данным [22] площадь контакта составляет 8 %, но для этого необходима специальная укладка верхнего слоя плоским по форме щебнем. В среднем величина напряжения в щебеночной призме на границе со шпалой будет равна 4,8 МПа. Если использовать полимерную прокладку между шпалой и щебнем, то каждая гранула щебня в поверхностном слое, контактирующая с прокладкой, продавливает ее. Подшпальная прокладка принимает сложную форму, а распределение напряжений в прокладке приобретает трехмерную картину с высокой интенсивностью вблизи контактов. Исследование влияния на работу железнодорожного пути демпфирующих прокладок под рельсы и шпалы изложено в [19, 20, 21, 22]. Начальная насыпная порозность щебня составляет 0,45–0,6, после уплотнения порозность уменьшается до 0,33–0,34. В эксплуатации порозность щебеночной призмы обычно составляет 0,36–0,4.

Физико-механические свойства полимерных материалов. Для борьбы с вибрациями необходимо разединить элементы конструкции верхнего и нижнего строения пути с помощью упруговязкопластических материалов в виде пластин, в том числе креплений от рельсов. Их упругопластические свойства определяют динамическое взаимодействие между железнодорожным полотном и подвижным составом. Для улучшения демпфирующих свойств нижнего строения пути в зависимости от типа крепления используют подрельсовые подкладки, нашпальные прокладки под рельсовыми подкладками, подшпальные прокладки, подбалластные маты [20]. Полимерные прокладки должны обладать не только высоким импедансом, или акустическим сопротивлением, но и упругопластическими свойствами, и износостойкостью (рис. 3). При этом следует помнить, что подрельсовые, нашпальные и подшпальные прокладки, подбалластные маты снижают только вертикальные и продольные динамические нагрузки, а статическая нагрузка (4) в среднем без изменений воздействует на песчаный слой под реперной шпалой и при повышенной влажности суглинка может приводить к нарушению устойчивости границы «песок — суглинок» и выплескам [1].

Требуются иные способы повышения устойчивости границ земляного полотна, например описанные в работе [21]. Как отмечается в [22], «упругие свойства подшпальных прокладок удлиняют линию прогиба рельса». В действительности это не совсем так: жесткость полимерных прокладок с увеличением осадка нелинейно возрастает. Кроме того, некоторые шпалы могут «зависать». Материалом для прокладки служит достаточно твердая резина или полиуретан. Сегодня эта важная деталь скрепления служит практически вдвое меньше, чем рельсы, и ее приходится заменять в период между капитальными ремонтами пути. Модуль упругости резины различных типов на 4–5 порядков ниже, чем для стали. Нижний предел рабочих температур эластичности резины обусловлен главным образом температурой стеклования каучуков, а для кристаллизующихся каучуков зависит также от температуры и скорости кристаллизации. Верхний температурный предел эксплуатации резины связан с термической стойкостью каучуков и поперечных химических связей, образующихся при вулканизации.

Авторы статьи [17] для различных марок резин экспериментально определили динамические свойства и разработали метод расчета динамического модуля упругости для любых условий работы: статической нагрузки, частоты и динамической деформации. Динамический модуль упругости E_d возрастает с увеличением нагрузки и частоты, коэффициент потерь η уменьшается с ростом нагрузки и увеличивается с частотой. Для деформаций, не превышающих 0,3 толщины слоя материала, модуль упругости и коэффициент потерь зависят линейно от нагрузки [23]. Для относительных деформаций более 0,3 проявляется нелинейный характер зависимости, которая хорошо аппроксимируется кубической параболой.

Для повышения коэффициента потерь в резино-подобные материалы добавляют минеральные, органические наполнители или углерод [24, 25, 26]. Но при этом существенно падает его прочность на разрыв, которая зависит от сил адгезии на границах матрицы и размеров включений. Такой композитный материал не может служить эффективным демпфером для грузонапряженных направлений. Однако подобные материалы нашли свое применение в качестве высокоэластичных резино-пробковых прокладок типа TRACKELAST FC584 (разработка Tiflex Limited, UK) на железных дорогах мира для высокоскоростного движения. Утилизация отработанных резиновых прокладок — дорогостоящая технология. И по-видимому, резина как материал для эластичных прокладок исчерпала свои возможности и при низких температурах не пригодна для тяжеловесного и высокоскоростного движения.

Большой класс работоспособных деталей и изделий изготавливают из полиуретана, имеющего

большой диапазон рабочих температур и являющегося заменителем традиционного эластомера — резины. На рис. 4 представлены экспериментально полученные зависимости модуля упругости от твердости, твердости от температуры и зависимость модуля упругости от температуры [27].

Перспективность полиуретанов для железнодорожного транспорта обусловлена тем, что их свойства существенно дополняют возможности использования других эластомеров (каучуков, резин). По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны — наиболее универсальный полимерный материал. Согласно [28, 29, 30] полиуретан характеризуется высокими физико-механическими свойствами, имеет большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, высокое сопротивление раздиру. Твердость образца становится постоянной и не зависит от толщины испытываемой пластины, начиная с образца толщиной 4 мм для полиуретана твердостью 95 ShA и с образца толщиной 6 мм для полиуретана твердостью 65 ShA. Полиуретановая технология производства значительно проще, чем резиновая, а это значит, что изделия из него дешевле, чем из резины (табл. 2).

В последнее десятилетие ведется поиск новых вибропоглощающих полимерных материалов, способных заменить каучуки и резины. Наибольшее внимание уделяется разработке высокопрочных материалов (ВПМ) на основе термоэластопластов ввиду их высокой эластичности, в том числе при отрицательных температурах (до -60°C). (Поэтому оптимальная область применения термоэластопластов — это северные районы России.) Прокладки из термоэластопластов — наиболее пригодные для грузонапряженных направлений и кривых участков пути, начали применяться на железных дорогах мира [31, 32] и еще ранее в пассажирских самолетах [33].

Во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ФГУП ВИАМ) разработаны листовые вибропоглощающие материалы [34, 35, 36] марок ВТП-1В и ВТП-2В на основе термоэластопластов. Материал ВТП-1В рекомендуется для применения в качестве покрытий, эластичных имитаторов силовых элементов фюзеляжа и вибродемпфирующих прокладок, работающих в диапазоне температур от -60 до $+80^\circ\text{C}$. Слоистый вибропоглощающий листовой материал ВТП-2В состоит из слоя листового материала ВТП-1В, адгезионного слоя из модифицированного поливинилацетата ВПС-2,5 и армирующего слоя алюминиевой фольги, усиленного стеклосеткой. Материал предназначен для работы в интервале температур от -60 до $+80^\circ\text{C}$ и рекомендуется для применения в качестве покрытий панелей фюзеляжа в местах повышенной виброакустической нагрузки. Свойства разработанных ВПМ в сравне-

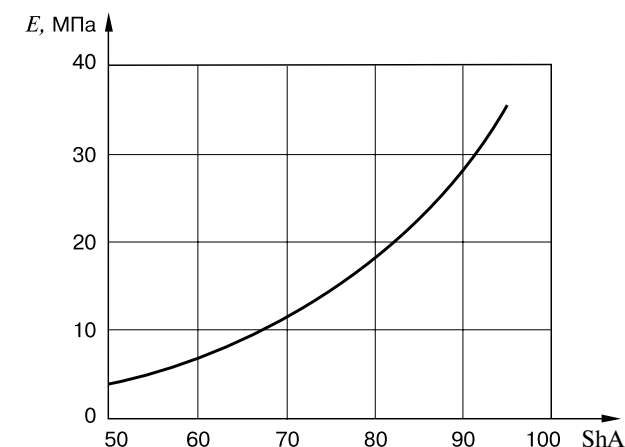


Рис. 3. Зависимость между статическим модулем упругости при сжатии и твердостью полиуретана [20]: E — статический модуль упругости; ShA — твердость в единицах по Шору

Fig. 3. Relationship between the static module of elasticity in compression and the hardness of polyurethane [20]: E — static modulus of elasticity; ShA — hardness by Shore

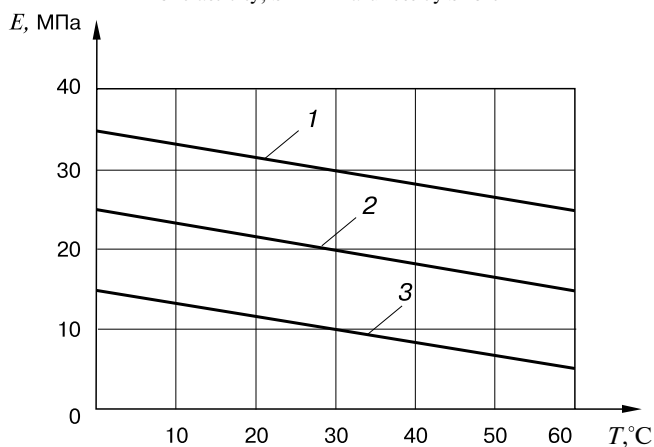


Рис. 4. Зависимость модуля упругости полиуретана от температуры [27]: 1 — полиуретан 95 ShA; 2 — полиуретан 85 ShA; 3 — полиуретан 65 ShA

Fig. 4. Dependence of the modulus of elasticity of polyurethane on temperature [27]: 1 — polyurethane 95 ShA; 2 — polyurethane 85 ShA; 3 — polyurethane 65 ShA

нии с резиной и полиуретаном приведены в табл. 2. Во ФГУП ВИАМ также проводятся исследования в области разработки слоистых вибропоглощающих материалов [37, 38]. К ним относится, например, вибропоглощающий алюмотермоэластопласт, представляющий собой «сэндвич», состоящий из двух наружных листов алюминиевого сплава и внутреннего слоя термоэластопласта и предназначенный для изготовления демпфирующих шайб и прокладок для крепления панелей интерьера и бортовой электронной аппаратуры с целью снижения вибрации и шума в салоне и кабине пассажирских самолетов. Утилизация прокладок из термоэластопласта — измельчение материала и безотходное термопрессование новых изделий.

В последние годы Российским химико-технологическим университетом (РХТУ) им. Д. И. Менделеева совместно с Институтом проблем химической

физики РАН разработан термоэластопласт на основе полиуретана [39]. Новый материал на основе полиуретановых термоэластопластов, содержащий нитроэфир в соотношениях (50:50), обладает высоким уровнем физико-механических характеристик: деформация ~1000 %, прочность ~5 МПа, модуль ~2,5 МПа.

Таким образом, на рынке представлено множество термоэластопластов, которые можно использовать в качестве демпферов в российских климатических зонах.

Выбор материала и конструкции полимерных прокладок. Анализ физико-механических свойств материалов (табл. 2), используемых в качестве полимерных прокладок на железных дорогах мира, превосходят резину по всем показателям, в том числе по стоимости экологически чистой утилизации. Стоимость прокладок из термоэластопластов выше резиновых примерно в два раза, но срок их эксплуатации в два с половиной раза дольше. Если учитывать затраты, возникающие при закрытии участков железной дороги во время проведения работ по техническому обслуживанию, то подшпальные прокладки являются чрезвычайно эффективной инвестицией, в особенности на железнодорожных линиях, подвергающихся повышенным нагрузкам. Выбор полиуретанов и термоэластопластов на европейских железных дорогах не случаен и основан на существенных эксплуатационных и технологических преимуществах, которые отличают эти материалы от резины. Износостойкость полиуретанов и термоэластопластов на порядок превышает износостойкость резины. Прочностные характеристики полиуретанов и термоэластопластов выше, чем у большинства типов резин. Эти материалы практически не подвержены старению и не изменяют своих характеристик в течение всего срока службы. Прочность связи «полиуретан — металл» значительно выше, чем в аналогичных резинометаллических соединениях.

В [31, 32, 37] описана история выбора материалов для прокладок, приведены современные типы прокладок и материалы, из которых они изготовлены, но без анализа их возможностей исходя из их физико-химических свойств. На мировом рынке представлено множество типов прокладок из резины и полиуретана для различных условий эксплуатации и рабочих температур. Из-за большой номенклатуры и отсутствия массовости выпуска стоимость полимерных прокладок относительно высокая. Для значительного снижения вибрации разработчики используют наполнители — древесную пробку, имеющую наибольшую адгезию с резиной, или двумерную текстильную структуру, или металлическую пластину, или шипы на поверхности прокладки для частичной компенсации напряжений. Для снижения истирания прокладок на периферии их изготавливают с отверстиями в центральной части. В настоящее время возникла настоятельная необходимость в унификации различных типов полимерных

Таблица 2

Сравнительные сведения для изделий из резины, полиуретана и термоэластопластов

Table 2

Comparative information for products made from rubber, polyurethane and thermoplastic elastomers

№ п/п	Показатели	Детали из резины	Детали из полиуретана	Детали из термоэластопласта ДСТ-30-01В
1	Компонентный состав	Неоднородный состав компонентов. Добавление натуральных компонентов, придающих эластичность, но сокращающих срок службы резины	Однородный состав компонентов. Полностью синтетический полимер с проектируемыми физико-механическими свойствами	Однородный состав компонентов. Полностью синтетический полимер с проектируемыми физико-механическими свойствами
2	Долговечность, устойчивость к внешним воздействиям	Детали начинают терять свои основные свойства сразу же после изготовления, становятся жесткими при хранении, растрескиваясь снаружи и размягчаясь внутри при эксплуатации, и утрачивают свое основное свойство — гибкость и упругость. Высокие и низкие температуры, озон, ультрафиолетовое излучение, топливо и масла, абразивный износ в эксплуатации интенсивно разрушают резину	Полиуретаны устойчивы к воздействию растворителей и химикатов, к неблагоприятным природным условиям, являются одним из наиболее стойких к абразивному износу (до 10 раз по сравнению с резиной); обладают устойчивостью к большинству органических растворителей, к озону и ультрафиолетовым лучам, морской воде	Термоэластопласты подвержены старению в меньшей степени, чем полиуретаны, имеют низкую температуру стеклования (-60°C) и высокую стойкость к воздействию окружающей среды, влагоемкость — менее 2%; устойчивы к воздействию растворителей и химикатов, к неблагоприятным природным условиям, являются одним из наиболее стойких к озону и ультрафиолетовым лучам, морской воде, к абразивному износу (до 10 раз по сравнению с резиной)
3	Морозостойкость	Резина российского производства имеет максимально рекомендуемое значение морозостойкости: -40°C	Стойкость полиуретана к высоким температурам до $+120^{\circ}\text{C}$, морозостойкость до -70°C	Стойкость термоэластопластов к высоким температурам до $+180^{\circ}\text{C}$, морозостойкость до -100°C
4	Абразивное изнашивание	Потеря массы резиновой пластины при абразивном износе составляет 0,5 % от веса за 60 мин	Потеря массы полиуретановой пластины при абразивном износе составляет 0,05 % от веса за 60 мин	Потеря массы пластины при абразивном износе составляет 0,02 % от веса за 60 мин
5	Абразивная стойкость. Методика Шабер Н.22. Весовой износ в мг за 1000 циклов при нагрузке 1 кг	нет данных	11	25
6	Коэффициент механических потерь при нагрузке и температуре 200°C и частоте 100 Гц, η	0,14	0,25	0,35–0,40
7	Температура эксплуатации, $^{\circ}\text{C}$	$-30 \dots +60$	$-35 \dots +70$ ($+120$ — кратковременно)	$-60 \dots +80$ ($+180$ — кратковременно)
8	Горючесть	Горючие	Горючие	Самозатухающие
9	Производство и утилизация	Производство: сложное. Утилизация: измельчение при температуре жидкого азота или сжигание	Литье. Утилизация сложная	Литье под давлением, безотходная переработка вторсырья — экструзия
10	Деформация обратимого растяжения, %	300–500	500–800	800–1030
11	Предел деформации разрыва, %	350	350	650–800
12	Сжимаемость	несжимаемы	несжимаемы	несжимаемы
13	Диэлектрические свойства	десятки кОм	1–5 МОм	1–5 МОм
14	Твердость по Шору, шкала А	60–65	69–70	65–96
15	Модуль упругости при 100 %, МПа	12	29	26–33
16	Модуль упругости при растяжении 300 %, $\text{кг}/\text{см}^2$	не выдерживает	67	44
17	Остаточная деформация, %	—	15	25
18	Предел прочности при разрыве, $\text{кг}/\text{см}^2$	115	312	360
19	Удлинение при разрыве, %	300	523	650
20	Коэффициент морозостойкости по эластичному восстановлению после сжатия при -50°C	0,2	0,45	0,53

прокладок по условиям эксплуатации, используемому материалу и конструкции, особенно для высокоскоростного и тяжеловесного движения.

В России такого разнообразия типов прокладок нет. В 2003 г. были рекомендованы прокладки-амортизаторы трех категорий: первая категория — для установки на деревянных шпалах с гарантийным сроком эксплуатации не менее 200 млн т пропущенного груза; вторая и третья — для установки на железобетонных шпалах в районах, где отрицательные температуры не ниже -45°C и в регионах с продолжительными морозами ниже -45°C соответственно; гарантийный срок эксплуатации — не менее 400 млн т груза брутто. Прокладки первой категории изготавливают из резины П-101, второй — 187301, третьей — 46ПМ-02. Срок службы таких прокладок не выше семи лет.

Опытные прокладки, изготовленные из резины 18730 на основе каучуков и различных марок технического углерода и армированные полиамидными волокнами и нитями, из полиуретана на основе простого полиэфира (АПИ-5), а также материала «Технолой», представляющего собой комбинацию термопластов и термоэластопластов, испытываются на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в скреплениях КБ-65 и ЖБР-65. Наилучший показатель относительной остаточной деформации после старения при сжатии (ОДС) у резин 13, 10-2, 18730С, ЯИ-60, материала ТПК-5, полиуретанового эластомерного материала АПИ-5. Для термоэластопластов «Технолой 2070» и ЛМД-6 характерно низкое сопротивление ОДС; такие материалы хорошо работают на сдвиг, поэтому их лучше применять для соответствующих конструкций прокладок.

Низкая номенклатура прокладок российского производства и их невысокое качество свидетельствует о том, что специалисты в области физико-химической механики не привлекались для выбора материала и их конструкций.

Заключение. 1. На базе теории волновых процессов обосновано применение дополнительной металлической пластины между подкладкой под рельс и прокладкой на шпалу, которая позволяет благодаря отражению в противофазе на границе «металл рельса—полимер» снизить амплитуду вибрационной волны в рельсе и колесе в шесть раз. А отражение вибрационной волны в сегменте «металлическая пластина—прокладка—бетонная шпала» уменьшает амплитуду волны более чем в три раза. В результате общий коэффициент демпфирования составляет ~ 19 .

2. На основе опубликованных экспериментальных исследований статических и динамических нагрузок на рельсы показано, что статическая и динамическая составляющие на ось тележки превосходят динамические ударные силы, которые возникают за счет непрерывных неровностей на колесах и рельсах, более чем на три

порядка из-за большой скважности импульсов ударных сил, даже для скорости движения состава $v=400$ км/ч.

3. Проанализированы физико-механические характеристики резин, полиуретанов и термоэластопластов: динамический модуль упругости приблизительно линейно возрастает с увеличением нагрузки на ось и частоты вибрации, коэффициент потерь η уменьшается с ростом нагрузки благодаря увеличению модуля упругости и увеличивается с частотой и при повышении температуры. Для относительных деформаций более 0,3 проявляется нелинейный характер зависимости, которая хорошо аппроксимируется кубической параболой.

4. По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны и термоэластопласты — наиболее универсальный полимерный материал для прокладок под рельсы и на шпалы. Для российского резко континентального климата следует в качестве подкладок под рельсы использовать термоэластопласты, а на шпалы — полиуретан. Для повышения коэффициента демпфирования между подкладкой и прокладкой следует установить алюминиевую пластину. Такая составная прокладка может «работать» и при низких температурах от -60°C , и при высоких до $+80^{\circ}\text{C}$.

5. С целью унификации множества различных типов полимерных прокладок по условиям эксплуатации, используемому материалу и конструкции необходим переход на составные высокомодульные прокладки «термоэластопласт—металл—полиуретан».

6. Для снижения амплитуды вибрационной волны, проходящей через скрепления в бетонную шпалу, необходимо изменить конструкцию подкладки из термоэластопласта так, чтобы прокладка закрывала поперек между рельсом и скреплением.

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 упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 6. С. 334–338. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-334-338>.
3. Бельков В. М. Моделирование упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 2 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 1. С. 61–64. DOI: <http://dx.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: <http://dx.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: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-312-320>.
6. Курган Д. М., Бондаренко И. О. Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений // Problemy Kolejnictwa. 2013. № 159. С. 99–111.

7. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология (теория и методы). М.: Мир, 1983. 880 с.
8. Гурьянов В. В. Математические модели распространения плоских сейсмических волн в нелинейных упругих и флюидонасыщенных сплошных средах: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 05.13.18. Саратов, 2007. 39 с.
9. Коломеев А. О. Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение тензометрического контроля колес вагонов в движении: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Томск, 2017. 23 с.
10. Вериго М. Ф. Динамика вагонов. Конспект лекций. М.: ВЗИИТ, 1971. 176 с.
11. Пановко Я. Г. Основы теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.
12. Сладковский А., Погорелов Д. Исследование динамического взаимодействия в контакте колесо—рельс при наличии ползунов на колесной паре // Вісник Східноукраїнського національного університету. 2008. № 5 (123). С. 103–112.
13. Наумов В. В., Виноградов В. В. Земляное полотно при воздействии повышенных осевых нагрузок // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 1. С. 22–24.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 720 с.
15. Наумов В. В. Надежность земляного полотна на участках обращения тяжеловесных поездов // Вестник ДИИТ. 2009. № 5. С. 183–186.
16. Евтух Е. С. Влияние рельсовых стыков на контактно-усталостную прочность колес железнодорожного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Брянск, 2014. 111 с.
17. Ващук Д. Б., Росин Г. С. Динамические свойства резины // Акустический журнал. 1973. Т. 19, вып. 2. С. 140–143.
18. Мазов Ю. Н., Локтев А. А., Сычев В. П. Оценка влияния дефектов колес подвижного состава на состояние железнодорожного пути // Вестник МГСУ. 2015. № 5. С. 61–72.
19. Тема № 9. Балластный слой. Назначение и требования, предъявляемые к балластному слою [Электронный ресурс]. URL: http://static.scbist.com/scb/uploaded/1_1386424319.pdf (дата обращения: 25.02.2018 г.).
20. Сычев В. П., Новожилов Т. В. Исследование влияния на работу железнодорожного пути демпфирующих прокладок под рельсы и шпалы // Наука и техника транспорта. 2016. № 1. С. 63–68.
21. Омарова Б. А. Способы улучшения виброзащитных свойств конструкций верхнего строения пути [Электронный ресурс]. 2014. 7 с. URL: <http://arch.kyrlibnet.kg/uploads/OMAROVA B.S..pdf> (дата обращения: 25.02.2018 г.).
22. Li D., Chrismer S. Methods of strengthening the way on low earthen canvas // Railway Track & Structures. 1999. No. 10. P. 15–18.
23. Подшпальные прокладки для верхнего строения железнодорожного пути [Электронный ресурс]: [Альбом] / Фирма Getzner. URL: <http://www.getzner.com/media...download/Brochure...Track RU.pdf> (дата обращения: 22.02.2018 г.).
24. Андреев В. Г., Бурлаков Т. А. Измерения сдвиговой упругости и вязкости резиноподобных материалов // Акустический журнал. 2007. Т. 53. № 1. С. 50–54.
25. Федотовский В. С., Верещагина Т. Н. Резонансная дисперсия продольных волн в дисперсных композитах // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 4. С. 497–504.
26. Федотовский В. С., Прохоров Ю. П., Верещагина Т. Н. Продольные волны сжатия в дисперсно-армированных композициях: препринт / ФЭИ-3169. Обнинск, 2009. 55 с.
27. Яковлев С. Н. О некоторых физических свойствах конструкционных полиуретанов [Электронный ресурс] // Известия Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 20 (46). URL: <http://science.spb.ru/files/IzvestiyaTI/2013/20/articles/18/files/assets/basic-html/toc.html> (дата обращения: 23.02.2018 г.).
28. Datta J. Synthesis and investigation of glycolysates and obtained polyurethane elastomers // Journal of Elastomers and Plastics. 2010. Vol. 42. P. 117–127.
29. Maity M. Polyblend systems of polyurethane rubber and silicone rubber in the presence of silane grafting agent // Journal of Elastomers and Plastics. 2001. Vol. 33. P. 211–224.
30. ReK V. Thermal degradation of polyurethane elastomers: Determination of kinetic parameters // Journal of Elastomers and Plastics. 2003. Vol. 35. P. 311–323.
31. Кноте К. Динамические свойства резиновых рельсовых подкладок: пер. с англ. // Железные дороги мира. 2005. № 8. С. 73–78.
32. Саржанов Т. С. Прокладки для скреплений [Электронный ресурс] / Казахский университет путей сообщения. URL: http://www.rusnauka.com/15.PNR_2007/Tecnic/21788.doc.htm (дата обращения: 22.02.2018 г.).
33. Новые вибропоглощающие материалы / Ю. В. Сытый [и др.] // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 51–54.
34. Вибропоглощающие материалы на основе термопластов / Ю. В. Сытый [и др.] // Труды ВИАМ: электронный журнал. 2013. № 3. URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/19.pdf> (дата обращения: 23.02.2018 г.).
35. Черкасов В. Д., Юркин Ю. В., Надькин Е. А. Вибропоглощающие материалы экстра-класса. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2007. С. 17–19.
36. Мясникова М. П., Позамонтир А. Г., Громов В. В. Методы регулирования вибропоглощающих свойств полимерных материалов // Материалы семинара «Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение». [Б. м.], 1974. С. 41–45.
37. Эффективные подрельсовые и напальные прокладки из материалов SYLOMER и SYLODYN [Электронный ресурс] / ООО «Акустические материалы и технологии» (Киев). URL: <http://www.acoustic.ua/articles/113> (дата обращения: 24.02.2018 г.).
38. Термоэластопласты, фторкаучуки, полисульфон: реферат по материаловедению [Электронный ресурс]. URL: <https://xreferat.com/108/1495-1-termoelastoplasty-ftorkauchuki-polisulfon>. Html (дата обращения: 22.02.2018 г.).
39. Физико-механические свойства полиуретановых термоэластопластов, пластифицированных нитроэфиром / Т. Б. Ломоносова, Ю. М. Лотменцев, Н. Н. Ильичева [и др.] // Успехи химии. 2010. Т. XXIV. № 3 (108). С. 51–55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

Статья поступила в редакцию 28.02.2018 г., актуализирована 29.06.2018 г., принята к публикации 30.07.2018 г.

Damping of dynamic forces by materials used in the construction of ballast and ballastless tracks. Polymer pads

V. M. BEL'KOV

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

Abstract. The article provides calculations of coefficients of polymer damping pads with elaborated materials that ensure minimal impact on soils under railway trackside and exclude its subsidence in a wide operating range of temperatures and frequencies. Application of additional metal plate between the pad under the rails and the pad on a sleeper was substantiated based

on the theory of wave processes, that allows reducing amplitude of vibrational waves in rail and wheel by six times due to reflection in reversed phase at the "rail metal—polymer" border, and reduces the amplitude of the wave by three times due to reflection of vibrational waves in the "metal plate—pad—concrete sleeper" segment. Considering Russian extreme continental climate ther-

moplastic elastomers are recommended to use as under-rail pads, and polyurethanes for sleepers. An aluminum plate should be installed to increase damping factor between lining and pads. Such a composite lining can be operated at extremely low temperatures from -60°C , and high to $+80^{\circ}\text{C}$. Significant amount of rubber and polyurethane pads is produced worldwide for different climatic and operating conditions. After conducting accelerated tests author suggests a transition to two or three types of "thermoplastic elastomer – metal – polyurethane" composite pads in order to unify a variety of different types of polymer pads according to the operating conditions, the material and construction used.

Keywords: elastic-viscoplastic properties of materials; damping; vertical vibration waves; layered polymeric materials; comparative analysis

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-310-320>

REFERENCES

- Bel'kov V. M., Antipov B. V. *Physicochemical basis of the track stability*. Railway Track and Facilities, 2013, no. 12, pp. 21–24.
- Bel'kov V. M. *Modelling of elastoviscoplastic properties of the subgrade. Problem statement 1*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2016, Vol. 75, no. 6, pp. 334–338.
- Bel'kov V. M. *Modelling of elastoviscoplastic properties of the subgrade. Problem statement 2*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2017, Vol. 76, no. 1, pp. 61–64.
- Bel'kov V. M. *Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 1*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2017, Vol. 76, no. 3, pp. 187–192.
- Bel'kov V. M. *Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 2*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2017, Vol. 76, no. 5, pp. 312–320.
- Kurgan D. M., Bondarenko I. O. *Model of the stress-strain state of a railway on the basis of the wave theory of stress propagation*. Problemy Kolejnictva, 2013, no. 159, pp. 99–111.
- Aki K., Richards P. *Quantitative seismology (theory and methods)*. Moscow, Mir Publ., 1983, 880 p.
- Gur'yanov V. V. *Mathematical models of the propagation of plane seismic waves in nonlinear elastic and fluid-saturated continuous media*. Dr. phys.-math. sci. diss. synopsis. Saratov, 2007, 39 p.
- Kolomeets A. O. *Algorithmic and software-technical support of strain gauge control of car wheels in motion*. Cand. tech. sci. diss. synopsis. Tomsk, 2017, 23 p.
- Verigo M. F. *Dynamics of cars. Lecture notes*. Moscow, VZIT Publ., 1971, 176 p.
- Panovko Ya. G. *Fundamentals of the theory of oscillations and impact*. St. Petersburg, Mashinostroenie Publ., 1976, 320 p.
- Sladkovskiy A., Pogorelov D. *Investigation of the dynamic interaction in the contact wheel – rail in the presence of sliders on a wheelset*. Visnik Skhidnoukrains'kogo natsional'nogo universitetu, 2008, no. 5 (123), pp. 103–112.
- Naumov V. V., Vinogradov V. V. *Railway roadbed under the influence of increased axial loads*. Railway Track and Facilities, 2011, no. 1, pp. 22–24.
- Korn G., Korn T. *Reference book of mathematics for scientists and engineers*. Moscow, Nauka Publ., 1970, 720 p.
- Naumov V. V. *Reliability of the subgrade in the areas of circulation of heavy haul trains*. Bulletin of the DIIT, 2009, no. 5, pp. 183–186.
- Evtukh E. S. *Impact of rail joints on the contact-fatigue strength of the wheels of railway rolling stock*. Cand. tech. sci. diss. Bryansk, 2014, 111 p.
- Vaschuk D. B., Rosin G. S. *Dynamic properties of rubber*. Akusticheskij zhurnal, 1973, Vol. 19, no. 2, pp. 140–143.
- Mazov Yu. N., Loktev A. A., Sychev V. P. *Evaluation of the effect of rolling stock wheel defects on the state of the railway track*. Vestnik MGSU, 2015, no. 5, pp. 61–72.
- Theme no. 9. *Ballast. Purpose and requirements for the ballast layer*. URL: http://static.scbip.com/scb/uploaded/1_1386424319.pdf (retrieved on 25.02.2018).
- Sychev V. P., Novozhilov T. V. *Investigation of the influence of damping pads on rails and sleepers on the work of a railway track*. Science and technology in transport, 2016, no. 1, pp. 63–68.
- Omarova B. A. *Ways to improve the vibroprotective properties of the structures of the superstructure*. 2014, 7 p. URL: http://arch.kyrlibnet.kg/uploads/OMAROVA_B.S..pdf (retrieved on 25.02.2018).
- Li D., Chrismer S. *Methods of strengthening the way on low earthen canvas*. Railway Track & Structures, 1999, no. 10, pp. 15–18.
- Under-sleeper pads for the upper structure of the railway track*. URL: <http://www.getzner.com/media...download/Brochure...Track RU.pdf> (retrieved on 22.02.2018).
- Andreev V. G., Burlakov T. A. *Measurements of shear elasticity and viscosity of rubber-like materials*. Akusticheskij zhurnal, 2007, Vol. 53, no. 1, pp. 50–54.
- Fedotovskiy V. S., Vereshchagina T. N. *Resonant dispersion of longitudinal waves in dispersed composites*. Akusticheskij zhurnal, 2010, Vol. 56, no. 4, pp. 497–504.
- Fedotovskiy V. S., Prokhorov Yu. P., Vereshchagina T. N. *Longitudinal waves of compression in dispersion-reinforced composites*. preprint. FEI-3169 Publ., Obninsk, 2009, 55 p.
- Yakovlev S. N. *On some physical properties of structural polyurethanes*. News of the Saint Petersburg State Polytechnic University, 2013, no. 20 (46). URL: <http://science.spb.ru/files/lzvetya-TI/2013/20/articles/18/files/assets/basic-html/toc.html> (retrieved on 23.02.2018).
- Datta J. *Synthesis and investigation of glycolysates and obtained polyurethane elastomers*. Journal of Elastomers and Plastics, 2010, Vol. 42, pp. 117–127.
- Maity M. *Polyblend systems of polyurethane rubber and silicone rubber in the presence of silane grafting agent*. Journal of Elastomers and Plastics, 2001, Vol. 33, pp. 211–224.
- Rek V. *Thermal degradation of polyurethane elastomers: Determination of kinetic parameters*. Journal of Elastomers and Plastics, 2003, Vol. 35, pp. 311–323.
- Knothe K. *Dynamic properties of rubber rail linings*. transl. from English. Zheleznye dorogi mira, 2005, no. 8, pp. 73–78.
- Sarzhonov T. S. *Pads for fastenings*. Kazakh University of Communications. URL: http://www.rusnauka.com/15.PNR_2007/Tecnic/21788.doc.htm (retrieved on 22.02.2018).
- Syty Yu. V., Sagomonova V. A., Kislyakova V. I., Bol'shakov V. A. *New vibration-absorbing materials*. Aviation materials and technologies, 2012, no. 2, pp. 51–54.
- Syty Yu. V., Sagomonova V. A., Kislyakova V. I., Bol'shakov V. A. *Vibration-based materials based on thermoplastics*. Proceedings of VIAM: electronic journal, 2013, no. 3. URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/19.pdf> (retrieved on 23.02.2018).
- Cherkasov V. D., Yurkin Yu. V., Nad'kin E. A. *Vibration absorbing materials of extra class*. Saransk, Mordovia University Publ., 2007, pp. 17–19.
- Myasnikova M. P., Pozamontir A. G., Gromov V. V. *Methods of regulation of vibration-absorbing properties of polymeric materials*. Materials of the seminar "Vibration-absorbing materials and coatings and their application". [S. l.], 1974, pp. 41–45.
- Effective under rail and nipple pads of materials SYLOMER and SYLODYN*. LLC Acoustic Materials and Technologies, Kiev. URL: <http://www.acoustic.ua/articles/113> (retrieved on 24.02.2018).
- Thermoplastic elastomers, fluororubber, polysulfone*. Abstract of materials science. URL: <https://xreferat.com/108/1495-1-termoelastoplasty-ftorkauchuki-polisulfon.html> (retrieved on 22.02.2018).
- Lomonosova T. B., Lotmentsev Yu. M., Il'icheva N. N., Kondakova N. N., Ganina L. V., Mikhaylov Yu. M. *Physicomechanical properties of polyurethane thermoplastic elastomers plasticized with nitroethers*. Uspekhi khimii, 2010, Vol. XXIV, no. 3 (108), pp. 51–55.

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir M. BEL'KOV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Consultant, Science and consultancy center (NKTs), JSC "VNIIZhT"

Received 28.02.2018

Revised 29.06.2018

Accepted 30.07.2018

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