

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ И ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ



Л.А. Илларионова



А.А. Локтев

Смоделировано поведение плиты основания безбалластного пути при динамических воздействиях. Именно такая конструкция в настоящее время является одной из наиболее перспективных. Для данной конструкции разрабатывается схема армирования сегмента плиты, состоящая из локальных сеток с круговыми стержнями под зоной опирания рельса на подрельсовом основании и общего объемного каркаса, рассчитываемого традиционными методами.

Ключевые слова: железнодорожный путь, безбалластное основание, балластный путь, упругая волна, математическая модель

EDN: KOEYOZ

На сегодняшний день в случае обычной железной дороги можно выделить два основных типа решения: с балластом и без балласта. Однако стандартизированной процедуры выбора между этими системами и соответствующими вариантами не существует, решение принимается в каждом конкретном случае.

Балласт обладает хорошими дренажными свойствами и высокой эластичностью, а также высоким уровнем шумопоглощения. Замена компонентов и исправление геометрии считаются простыми. Он имеет относительно низкую стоимость строительства по сравнению с безбалластным путем.

К недостаткам балластного пути можно отнести относительно небольшой срок службы между ремонтами и высокие требования к обслуживанию. Из-

за повторяющихся динамических нагрузок балласт изнашивается относительно быстро, необходимы работы по техническому обслуживанию (трамбовка, очистка балласта и т.д.) для исправления выравнивания, очистки и изменения профиля балластного слоя. Это приводит к высоким затратам на техническое обслуживание в течение всего срока службы, что отражается на подорожание в течение всего жизненного цикла.

Другим недостатком при работе на высоких скоростях является вылет балласта (также называемый захватом балласта или взбалтыванием), который представляет собой явление, когда отдельные камни вылетают из балластного слоя при воздействии аэродинамических сил и вызывают значительные повреждения как колесных пар и рельсов, так и элементов

Илларионова Лилия Алексеевна, старший преподаватель кафедры «Здания и сооружения на транспорте» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: проектирование объектов транспортной инфраструктуры, железнодорожный путь. Автор 28 научных работ.

Локтев Алексей Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: механика деформированного тела, моделирование объектов транспортной инфраструктуры, железнодорожный путь, реконструкция объектов исторического и архитектурного наследия. Автор 189 научных работ, в том числе трех монографий.

кузова подвижного состава. Подобное явление может происходить и с кусочками льда, что является фактором, который следует учитывать в странах с холодным климатом [1].

Для уменьшения износа балласта, было предпринято несколько различных попыток улучшить распределение нагрузки между элементами пути. Другим возможным подходом является повышение долгосрочной несущей способности основания. Это может быть достигнуто путем введения дополнительной жесткости с помощью долговечных материалов между земляным полотном и балластным слоем. Контактные напряжения на балласте также можно уменьшить, используя большую контактную поверхность путем увеличения площади шпалы или перехода к безбалластной конструкции пути [2;3].

Безбалластные путевые системы можно разделить на три основные группы в зависимости от типа рельсовой опоры, а именно дискретную рельсовую опору, сплошную рельсовую опору или конструкцию с рельсовой плетью, омоноличенной в путевом бетоне (рис.1).

Категорирование также может быть сделано на основе места производства, в этом случае можно назвать сборные системы (которые производятся на заводе и транспортируются на строительную площадку) или монолитное строительство, где бетонная плита системы заливается на месте. Отдельным вопросом является армирование безбалластной конструкции пути.

На данный момент, чаще всего используется традиционная методика армирования, учитывающая динамическое приложение нагрузки только в квазистатической постановке, с учетом особенностей

изменения нагрузки от времени через совокупность уточняющихся коэффициентов. В случае расчета безбалластного пути необходимо также производить учет динамической высокочастотной и волновой нагрузки, которая особенно характерна для высокоскоростного транспорта из-за большой интенсивности потока движения с небольшими интервалами движения и большой скорости движения подвижного состава – около 250 км/ч.

Также необходимо производить учет дефектов, расположенных на поверхности катания колеса и рельса. После прихода колесной пары в заданную точку рельсовой плети между колесом и рельсом появляется сила взаимодействия $P=P(t)$, которая затем перераспределяется по другим элементам железнодорожного пути в процесс деформирования, на котором этапы нагружения и разгрузки чередуются с учетом затухания динамических характеристик [4;5].

Часто взаимодействие происходит с учетом дефектов, расположенных на поверхности катания. Дефекты могут многократно увеличивать динамические процессы. К примеру, состав из 70 вагонов при наличии дефектов на некоторых колесах может вызывать дополнительную динамическую нагрузку в несколько тысяч взаимодействий за одну минуту (рис. 2) [6].

При высоких скоростях движения, как показывают работы отечественных и зарубежных исследователей требуется учитывать волновые процессы в одномерной постановке при определении параметров приложения нагрузки [7]. Распространение упругих волн имеет существенное значение в случаях, когда скорость движения экипажа становится соизмеримой со скоростью акустической волны в материалах, входящих в верхнее строение пути. При учете напряжений



Рис. 1. Пример конструкции безбалластного пути для городского транспорта

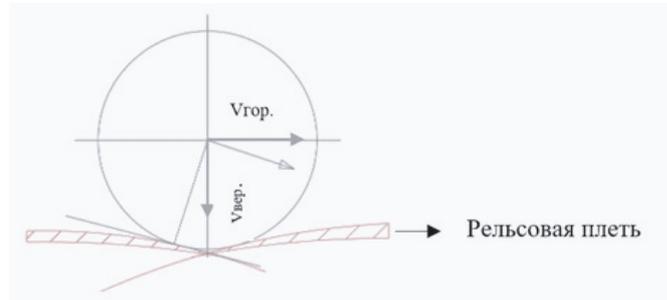


Рис. 2. Взаимодействие колеса и области вблизи поверхности катания рельса

в рельсовых плетях можно отметить, что возможно уменьшение скорости фронта упругой волны из-за «эффекта запираания».

В рассматриваемой одномерной задаче динамического поведения рельсовой плети, предлагается использовать следующее выражение, определяющее связь между состоянием пути и внешней нагрузкой

$$\sigma = -\rho_0 G_0 V. \quad (1)$$

где $G_0 = \sqrt{E_0} / \rho_0$ – скорость упругой волновой поверхности; V – скорость частиц рельса вдоль его оси; E_0 и ρ_0 – модуль упругости и плотность материала модельного плоского элемента соответственно.

В зоне контакта колеса и рельса выражение (1) примет вид:

$$P = -\rho_0 G_0 F V. \quad (2)$$

Соотношение для местных деформаций

$$\alpha = V_0 t - \frac{1}{m_0} \int_0^t dt_1 \int_0^{t_1} P(t_2) dt_2 - \frac{1}{\rho_0 G_0 F} \int_0^t P(t) dt. \quad (3)$$

Уравнение относительно местной деформации $\alpha(t)$:

$$\ddot{\alpha} + a_1 \dot{\alpha} + \frac{k}{m} \alpha^{3/2} = 0, \quad (4)$$

где $\alpha_1 = -k(2\pi\rho h G^{(2)} R^{1/2})^{-1}$, здесь $G^{(2)} = \sqrt{K\mu / \rho}$ – скорость поперечной сдвиговой волны.

При переходе от линейной задачи к плоскости верхнее строение железнодорожного пути в качестве отдельной конструкции более точно моделируется плоскими элементами, то для уточнения используемой модели предлагается рассмотреть деформирование состояние элементарного объема. При этом необходимо также производить учет влияния нестационарных процессов на деформирование малого элемента.

Динамическое поведение точек таких элементов под воздействием циклической нагрузки, получае-

мых из стандартных уравнений равновесия элементарного параллелепипеда с размерами dx, dy, dz , и плотностью ρ [8;9].

$$\begin{cases} (x+G) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + G \nabla^2 u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ (x+G) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + G \nabla^2 v = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ (x+G) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + G \nabla^2 w = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \end{cases} \quad (5)$$

где $\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ – оператор объемной деформации; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа;

$x = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}$; E и G – модуль Юнга и сдвига,

где v – коэффициент поперечной деформации; u, v, w – линейные перемещения точек элементов вдоль основных координатных осей Ox, Oy, Oz [10;11].

Для учета волновых процессов удобнее перейти в выражениях типа (5) от механических традиционных характеристик к величинам, определяющим характер распространения волн. Введем новое обозначение C_1 , представляющее скорость распространения упругой волны для идеальной среды

$$C_1 = \sqrt{\frac{x+2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-v)E}{(1+v)(1-2v)\rho}}. \quad (6)$$

Решение дифференциального уравнения типа (4) обычно ищется в виде:

$$u(x,t) = A \sin \left[\frac{2\pi}{l_1} (x - C_1 t) \right], \quad (7)$$

Здесь A – амплитуда колебательного движения; l_1 – длина волны, распространяющейся вдоль заданного направления.

Описанные величины позволяют определить период колебаний:

$$T_1 = \frac{l_1}{c_1}. \quad (8)$$

Данные величины важны при численном решении определяющих уравнений, так как от них зависит число разбиений характерных временных интервалов на элементарные отрезки, на которых считается, что определенные функции ведут себя линейно. После определения перемещений и связанных с ними напряжений можно понять картину деформирования плоской плиты основания железнодорожного пути от поездной динамической нагрузки и перейти к разработке рекомендаций по уменьшению и выравниванию прогибов плоского элемента путем его армирования (рис. 3.)

Местные и общие каркасы объединяются в один путем сварки вертикальными стержнями, а оптимальная работа и совместимость деформаций достигается за счет разработки дополнительного каркаса с круглыми арматурными стержнями в области распространения волн с наибольшей интенсивностью (т.е. фактически в месте контакта рельса и подрельсового основания) (рис.4).

Заключение

Учет распространения волновых поверхностей при армировании безбалластной конструкции пути, позволит подбирать коэффициент армирования с учетом наибольших деформаций, а не по усредненному показателю для армирования железобетонных конструкций. В работе представлена математическая модель деформирования плиты основания безбалластного пути для городского транспорта, учитывающая анизотропные свойства железобетонной конструкции, волновые процессы в виде распространения упругих волн, число которых зависит от количества осей анизотропии, а скорость определяется плотностью материала и механическими параметрами (модулями упругости и сдвига в направлениях и плоскостях анизотропии), также учитывается динамический характер приложения нагрузки. Предложенная модель реализована в виде схемы армирования железобетонной плиты, включающей локальные армирующие сетки с круговой арматурой и пространственные каркасы традиционного типа, которые затем связываются между собой в единую конструкцию. 

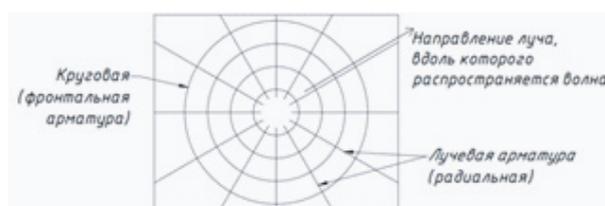
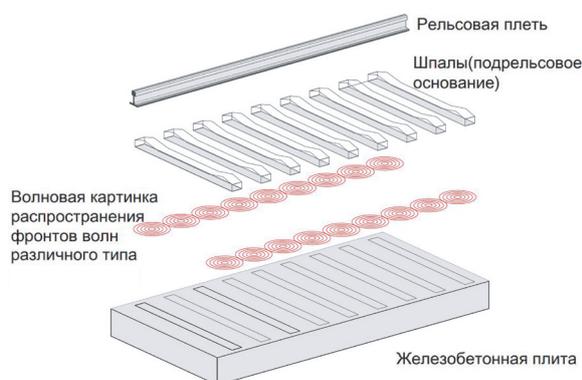


Рис. 4. Схема расположения армирующих элементов

Рис. 3. Модель безбалластной конструкции пути

Литература

1. Коган, А.Я. Методика определения расчетного срока службы безбалластного пути / А.Я. Коган, А.В. Савин. – Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – Т.76, №1. – С. 3–9.
2. Колос А.Ф., Петрова Т.М., Сидоренко А.А. Проблемы эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали / А.Ф. Колос, Т.М. Петрова, А.А. Сидоренко. – Текст: непосредственный // Техника железных дорог. – 2013. – №2 (22). – С. 42–47.
3. Коган, А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А.Я. Коган. – Москва: Транспорт, 1997. – 326 с. – ISBN 5-277-02025-X. – Текст: непосредственный.
4. Gridasova E.A., Nikiforov P.A., Loktev A. The influence of high-frequency cyclic loading on the mechanical properties of steel. Mater. Sci. Forum, 2018, vol. 945, pp. 549–555. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.549 EDN: CKGQSU.
5. Loktev A.A., Korolev V.V., Shishkina I.V. High frequency vibrations in the elements of the rolling stock on the railway bridges. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2018, vol. 463, art. 032019. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032019 EDN: WSXWMW.
6. A. Savin, O. Suslov, V. Korolev [et al.] Stability of the Continuous Welded Rail on Transition Sections / Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1115 AISC. – P. 648–654. – DOI 10.1007/978-3-030-37916-2_62. – EDN: EPASWM.
7. Савин, А.В. Критерии выбора конструкции безбалластного пути / А.В. Савин. – Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – №2. – С. 2–8.
8. Илларионова, Л.А. Влияние волновых процессов на армирование плиты основания безбалластного железнодорожного пути / Л.А. Илларионова, А. А. Локтев. – Текст: непосредственный // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – Вып. 12. – С. 1632–1643. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1632-1643.
9. Илларионова, Л.А. Моделирование анизотропной плиты основания безбалластного железнодорожного пути при динамических воздействиях / Л.А. Илларионова, А.А. Локтев. – Текст: непосредственный // Вестник МГСУ. – 2020. – Т.15. – Вып. 8. – С. 1111–1111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1111-1111.
10. Модель сегмента плиты основания безбалластного пути / А.А. Локтев, Е.В. Запольнова, Е.А. Гридасова, К.Ю. Тальских. – Текст: непосредственный // Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования: материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня рождения профессора Ю.Н. Меренкова, Елец, 24 апреля 2019 года. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2019. – С. 25–31. – EDN: XBVDFFX.
11. Запольнова, Е.В. Моделирование динамического поведения секции плиты безбалластного основания железнодорожного пути / Е.В. Запольнова, А.А. Локтев, К.Д. Степанов. – Текст: непосредственный // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXV международного симпозиума имени А.Г. Горшкова, Вятчи, 18–22 марта 2019 года. – Вятчи: ООО «ТРП», 2019. – С. 100–102. – EDN: DGDGFCR.