

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 691.11

Б.А. БОНДАРЕВ, М.А. ГОНЧАРОВА, И.А. ТКАЧЕВА, Е.В. ЧУРСИН

РАСЧЕТ ШПАЛ ИЗ ДРЕВЕСНОСТЕКЛОВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ДЕЙСТВИЕ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В основе расчета элементов конструкции линейных сооружений лежит определение величины прогибов и напряжений в поперечных сечениях с целью нахождения критических значений прочности и трещиностойкости элементов сооружения. При этом шпалы рассматриваются как балка на упругом основании, которая нагружена сосредоточенными силами и моментами. В работе рассмотрены силы, действующие на несущий элемент из древесностекловолоконного композиционного материала, а также силы, действующие на шпалу. Предложена новая модель системы сил, при которой сосредоточенная сила и сосредоточенный момент возможно заменить системой трех сил. В таком случае нагрузка от рельса на шпалу представляется многоступенчатой. Разработана модель системы сил для расчета элементов конструкции из композита. С помощью метода А.Н. Крылова представляется возможным расчет начальных параметров на всех участках конструкции с последующим нахождением прогибов, изгибающих моментов, поперечных сил в любом сечении балки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: композиционный материал, балка на упругом основании, сосредоточенные силы и моменты, прогибы, линейное сооружение.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-752-8-5-12

Несущие элементы мостовых сооружений обычно рассчитывают на установившуюся прочность и трещиностойкость. Кроме того, определяют их прогибы и давление на балласт [1, 2].

Расчеты на прочность и трещиностойкость шпал ведут по нормальным и касательным напряжениям в поперечных сечениях несущего элемента. Напряжения в поперечных сечениях и прогибы можно определять только зная характер опирания на балласт и нагрузки, которые действуют на элемент с продольных брусьев [3–5]. Нагрузки от продольных элементов на несущие элементы и нагрузки от действия балласта вычисляются согласно методике А.Ф. Золотарского [6].

При определении сил, действующих от продольного несущего элемента, его рассматривают как бесконечно длинную балку на упругом основании,

подвергающуюся пространственному изгибу и кручению горизонтальными и вертикальными силами. При этом изучают взаимодействие колеса с продольным элементом [7, 8].

Упругое основание рельса оказывает сопротивление изгибу в вертикальной и горизонтальной плоскостях и кручению [9]. Принимают, что величина сопротивления пропорциональна упругой деформации в каждом из этих направлений, а коэффициент пропорциональности именуется модулем упругости основания в этом направлении. Основание под продольным элементом (например, рельсом) характеризуется:

U – модулем упругости подрельсового основания при изгибе рельса в вертикальной плоскости;

U_z – модулем упругости подрельсового основания при изгибе рельса в горизонтальной плоскости при одновременном действии боковых и вертикальных сил;

U_ϕ – модулем упругости подрельсового основания на кручение [10].

Стоит отметить, что модуль упругости при сжатии поперек волокон составляет 500–1000 МПа, а модуль упругости железобетона при сжатии 30 000–40 000 МПа, т.е. в десятки раз больше. Это различие прямым образом влияет на значение модуля упругости подрельсового основания в вертикальной плоскости. Для пути с новыми деревянными шпалами среднее значение модуля U в летних условиях составляет 35–55 МПа. Для сравнения, при одинаковых климатических условиях пути с железобетонными шпалами без упругих прокладок или с малосжимаемыми деревянными прокладками имеют модуль U в пределах 200–250 МПа [11].

Модуль упругости при сжатии рассчитываемого композита составляет $1,61 \cdot 10^4$ МПа. Следовательно, модуль U подрельсового основания при прочих равных условиях для шпал из рассчитываемого композита будет меньше, чем для железобетонных шпал. Однако из-за отсутствия данных принимаем модуль упругости подрельсового основания так же, как и для железобетонных шпал, МПа: $U = 167$; $U_z = 72$; $U_\phi = 329$.

Принимаем, что под рассчитываемой шпалой находится колесо с максимальными вертикальными и боковыми силами. В этом сечении рельса будут и наибольшие деформации. Силы, которые при этом передаются на нижележащую шпалу, определяем как произведение наибольшей деформации рельса на соответствующий модуль упругости подрельсового основания и на расстояние между осями шпал:

- вертикальная сила;
- горизонтальная сила;
- момент.

Прогиб рельса под вертикальной силой зависит от модуля упругости рельсовой стали и составляет $E_p = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. Определяем по формуле

$$y_0 = \frac{kP_{\text{дин}}}{2U}.$$

При этом динамическая нагрузка $P_{\text{дин}}$ вычисляется по формуле

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{ср}} + 2,5S,$$

где $P_{\text{ср}}$ – среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс;

S – среднее квадратическое отклонение этой нагрузки;
 2,5 – коэффициент, соответствующий вероятности 0,994.

Средняя нагрузка колеса на рельс определяется по формуле

$$P_{cp} = P_{ст} + 0,75P_p,$$

где P_p – максимальное усилие, кН.

Зная, что максимальное усилие P_p равно 40 кН с учетом приведенной жесткости рессор к колесу $\xi = 2$ кН/мм, а нагрузка от грузового вагона $P_{ст}$ составляет 115 кН при расчетной скорости $V = 80$ км/ч, вычисляем P_{cp} , кН

$$P_{cp} = 115 + 40 \cdot 0,75 = 145 \text{ кН.}$$

Рассчитаем величину динамической нагрузки с учетом среднее квадратического отклонения:

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{НП}^2 + S_{НЕР}^2 + 0,95S_{ННК}^2 + 0,05S_{ИНК}^2} = \\ = \sqrt{0,08 \cdot 40 + 0,28^2 + 24,2^2 + 0,05 \cdot 22,7^2 + 0,95 \cdot 1,65^2} = 24,8 \text{ кН,}$$

$$P_{дин} = 145 + 2,5 \cdot 24,8 = 207 \text{ кН.}$$

В кривых участках пути к расчетной вертикальной динамической нагрузке добавляется перегрузка наружного рельса под действием так называемой «рамной» силы, возникающей при вписывании экипажа в кривую

$$P_{дин} = P_{дин} + \Delta P,$$

где ΔP , кН, зависит от радиуса колеса, расстояния между осями рельсов и рамной силы. Тогда

$$\Delta P = \frac{z_p r}{t} = \frac{58,2 \cdot 0,95}{1,52 \cdot 2} = 18,2 \text{ кН.}$$

Следовательно,

$$P_{дин}^{кр} = 207 + 18,2 = 225,2 \text{ кН.}$$

Горизонтальная динамическая сила определяется для выбранного вагона по формуле:

$$H_{дин} = (54 + 25a_{НН})(1 + 0,003V) = \\ = (54 + 25 \cdot 0,7) \cdot (1 + 0,003 \cdot 80) = 88,8 \text{ кН.}$$

Горизонтальные боковые силы $H_{дин}$, приложенные к головке рельса, вызывают его кручение. Скручивающий момент от совместного действия на рельс боковых вертикальных сил определяют по формуле:

$$M_{кр} = H_{дин} h_{кр}, \\ \Delta F = \frac{3M_{ш}}{2l}.$$

На шпалу действуют вертикальные силы $P_{ш}$, горизонтальные силы, момент от кручения рельса, передаваемый на подрельсовое сечение шпалы, а также распределенная нагрузка от балласта, пропорциональная прогибам шпалы.

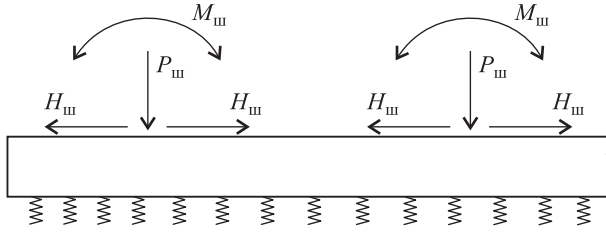


Рис. 1. Схема нагружения шпалы

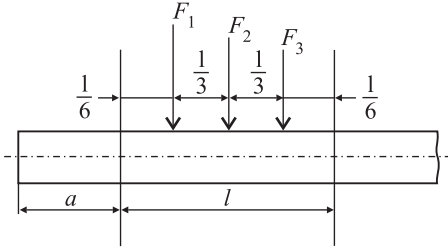


Рис. 2. Система сил, заменяющая распределенную нагрузку

Расчетная схема шпалы рассматривается как балка на упругом основании, нагруженная сосредоточенными силами и моментами (рис. 1).

Предлагается замена сосредоточенной силы и сосредоточенного момента системой трех сил $-F_1, F_2, F_3$ (рис. 2).

Здесь $F_1 = F_2 + \Delta F$, а $F_3 = F_2 - \Delta F$.

Сила ΔF определяется из условия

$$M_{ш} = \Delta F \frac{2}{3} l, \text{ тогда}$$

$$\Delta F = \frac{3M_{ш}}{2l}.$$

При таком представлении нагрузка от рельса на шпалу с приемлемой точностью шпалы с непрерывным изменением поперечного сечения может быть заменена многоступенчатой, с постоянным поперечным сечением внутри каждой ступени.

Для каждой ступени предлагается использовать решение для балки постоянного непрерывного сечения на упругом основании, нагруженной системой сосредоточенных сил. Наиболее приемлемо решение по методу начальных параметров (метод А.Н. Крылова). В расчетах присутствуют выведенные А.Н. Крыловым функции $-k_0(\beta_i z_i), k_1(\beta_i z_i), k_2(\beta_i z_i), k_3(\beta_i z_i)$.

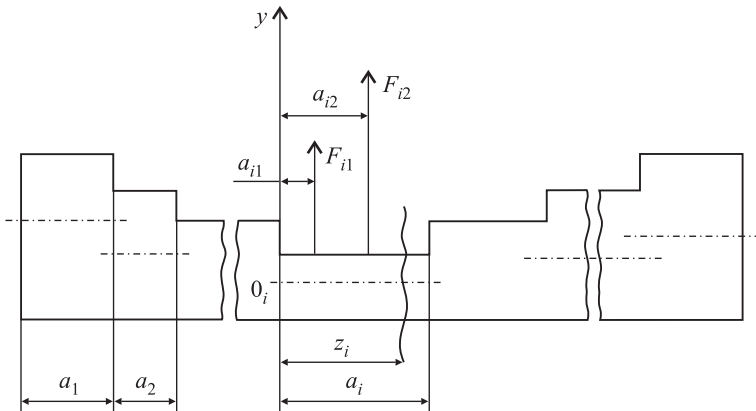


Рис. 3. Ступенчатая балка нагружения системой сосредоточенных сил

На i -м участке выражения для прогибов (y_{0i}), углов поворота (θ_{0i}), изгибающих моментов (M_{0i}) и поперечных сил (Q_{0i}) имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y(z_i) &= y_{0i} k_0(\beta_i z_i) + \theta_{0i} \frac{1}{\beta_i} k_1(\beta_i z_i) + M_{0i} \frac{1}{\beta_i^2 EI_i} k_2(\beta_i z_i) + \\
 &+ Q_{0i} \frac{1}{\beta_i^3 EI_i} k_3(\beta_i z_i) + \sum \frac{F_{ij}}{\beta_i^3 EI_i} l(a_{iy}) k_3[\beta_i(z_i - a_{ij})], \\
 \theta(z_i) &= -4\beta_i k_3(\beta_i z_i) y_{0i} + \theta_{0i} k_0(\beta_i z_i) + \frac{M_{0i}}{\beta_i EI_i} k_1(\beta_i z_i) + \\
 &+ \frac{Q_{0i}}{\beta_i^2 EI_i} k_1(\beta_i z_i) + \sum \frac{F_{ij}}{\beta_i^2 EI_i} l(a_{iy}) k_2[\beta_i(z_i - a_{ij})], \\
 M(z_i) &= -4\beta_i^2 EI_i y_{0i} k_2(\beta_i z_i) - 4\beta_i EI_i \theta_{0i} k_3(\beta_i z_i) + \\
 &+ M_{0i} k_0(\beta_i z_i) + Q_{0i} \frac{1}{\beta_i} k_1(\beta_i z_i) + \sum \frac{F_{ij}}{\beta_i} l(a_{iy}) k_1[\beta_i(z_i - a_{ij})], \\
 Q(z_i) &= -4\beta_i^3 EI_i k_1(\beta_i z_i) y_{0i} - 4\beta_i^2 EI_i y_{0i} k_2(\beta_i z_i) \theta_{0i} - \\
 &- M_{0i} 4\beta_i k_3(\beta_i z_i) + Q_{0i} k_0(\beta_i z_i) + \sum F_{ij} l(a_{iy}) k_0[\beta_i(z_i - a_{ij})].
 \end{aligned}$$

В итоге, единичная функция имеет вид

$$l(a_{ij}) = \begin{cases} 0, & z \leq a_{ij} \\ 1, & z > a_{ij} \end{cases}.$$

В результате проделанной работы, используя условия сопряжения участков, можно получить систему уравнений, из решений которой находятся начальные параметры (y_{0i} , θ_{0i} , M_{0i} , Q_{0i}) на всех участках. Зная начальные параметры на каждом участке, можно достаточно просто найти прогибы, изгибающие моменты и поперечные силы в любом сечении балки.

По поперечным силам и изгибающим моментам по известным формулам сопротивления материалов легко определяются касательные и нормальные напряжения в любой точке поперечного сечения балки.

На основании выведенной системы уравнений составлена программа расчета прогибов, поперечных сил и изгибающих моментов ступенчатой балки на упругом основании. В ней предусмотрена возможность использования схемы приложения сосредоточенных моментов. Программа может иметь возможность построения эпюр прогибов, изгибающих моментов, поперечных сил, нормальных и касательных напряжений в заданных точках. С помощью программы могут быть рассчитаны брусья стрелочных переводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аскадский А.А., Мацевич Т.А., Кондращенко В.И. Расчетная схема для оценки реологических свойств полимеров и их смесей // Строительные материалы. 2018. № 10. С. 64–68.

2. *Бондарев Б.А., Бондарев А.Б., Корнеева А.О., Басинских Е.В.* Древесностекловолокнистые композиционные материалы на основе полиэфирных смол для конструкций шпал лесовозных железных дорог // *Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 17 июня 2021 г.* Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г.Ф. Морозова, 2021. С. 198–204.
3. *Бондарев Б.А.* Шпалы из древесноволокнистых композиционных материалов для лесовозных железных дорог широкой и узкой колеи: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 1996. 42 с.
4. *Божелко И.К.* Физико-механические свойства комбинированных деревянных шпал // *Труды БГТУ.* 2018. Сер. 1, № 2. С. 211–217.
5. *Кондращенко В.И., Харчевников В.И., Стородубцева Т.Н., Бондарев Б.А.* Древесностекловолокнистые композиционные шпалы. М.: Спутник+, 2009. 311 с.
6. Железобетонные шпалы для рельсового пути / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Ф. Золотарского. М.: Транспорт, 1980. 265 с.
7. *Иванов А.Н.* Проблемы применения полимерных композиционных материалов в несущих конструкциях железнодорожных мостов // *Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщения.* 2020. № 3. С. 29–37.
8. *Кондращенко В.И., Савин А.В., Ван Ч.* Композиционные подрельсовые основания. Конструкции // *Строительные материалы.* 2020. № 10. С. 52–76.
9. *Овчинников Д.В., Показукий В.А., Галлямов Д.И.* Определение модуля упругости подрельсового основания железнодорожного пути методом конечных элементов // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона.* 2019. Т. 1. С. 585–591.
10. Прочность. Устойчивость. Колебания: Справ.: В 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Биргера И.А. и Пановко Я.Г. М.: Машиностроение, 1968. 831 с.
11. *Стородубцева Т.Н., Федянина Н.В.* Композиционный материал на основе отходов лесного комплекса для железнодорожных шпал // *Современные наукоемкие технологии.* 2011. № 5. С. 49–52.

Бондарев Борис Александрович, д-р техн. наук, проф.

Липецкий государственный технический университет

Гончарова Маргарита Александровна, д-р техн. наук, проф.

Липецкий государственный технический университет

Ткачева Ирина Александровна, ст. препод.

Липецкий государственный технический университет

Чурсин Егор Викторович, студ.

Липецкий государственный технический университет

Получено 23.07.2021

Bondarev Boris Alexandrovich, DSc, Professor

Lipetsk State Technical University, Russia

Goncharova Margarita Alexandrovna, DSc, Professor

Lipetsk State Technical University, Russia

Tkacheva Irina Alexandrovna, Senior Lecturer

Lipetsk State Technical University, Russia

Chursin Yegor Viktorovich, Student

Lipetsk State Technical University, Russia

CALCULATION OF WOOD-GLASS-FIBER COMPOSITE MATERIALS FOR STATIC LOADS IN ELEMENTS OF TRANSPORTATION STRUCTURES

At present, the calculation of structural elements of linear structures is based on determining the magnitude of deflections and stresses in cross sections in order to find the

critical values of strength and crack resistance of structural elements. In this case, sleepers are considered as a beam on an elastic foundation, which is loaded with concentrated forces and moments. The paper considers the forces acting on the load-bearing element made of fiberglass composite material, as well as the forces acting on the sleeper. A new model of the system of forces is proposed, in which a concentrated force and a concentrated moment can be replaced by a system of three forces. In this case, the load from the rail to the sleeper appears to be multi-stage. A model of the system of forces for the calculation of structural elements made of composite has been developed. Using the method of A.N. Krylov, it is possible to calculate the initial parameters in all sections of the structure with the subsequent finding of deflections, bending moments, shear forces in any section of the beam.

Key words: composite material, beam on an elastic foundation, concentrated forces and moments, deflections, line structure.

REFERENCES

1. *Askadskiy A.A., Matseyevich T.A., Kondrashchenko V.I.* Raschetnaya skhema dlya otsenki reologicheskikh svoystv polimerov i ikh smesey [Calculation scheme for estimation of rheological properties of polymers and their blends]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials]. 2018. No. 10. Pp. 64–68. (in Russian)
2. *Bondarev B.A., Bondarev A.B., Korneyeva A.O., Basinskikh Ye.V.* Drevesnosteklovoloknistyye kompozitsionnyye materialy na osnove poliefirnykh smol dlya konstruksiy shpal lesovoznykh zheleznykh dorog [Wood-glass-fiber composite materials based on polyester resins for timber railway sleeper structures]. *Sovremennyye mashiny, oborudovaniye i IT-resheniya lesopromyshlennogo kompleksa: teoriya i praktika: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern machines, equipment and IT solutions for the timber industry: theory and practice: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Voronezh, 2021. Pp. 198–204. (in Russian)
3. *Bondarev B.A.* Shpaly iz drevesnovoloknistykh kompozitsionnykh materialov dlya lesovoznykh zheleznykh dorog shirokoy i uzkoj kolei: Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Wood-fiber composite sleepers for wide and narrow gauge logging railways: Extended abstract of Doctor's thesis]. Voronezh, 1996. 42 p. (in Russian)
4. *Bozhelko I.K.* Fiziko-mekhanicheskiye svoystva kombinirovannykh derevyannykh shpal [Physical and mechanical properties of combined wooden sleepers]. *Trudy BG TU* [Proceedings of BSTU]. 2018. Ser. 1. No. 2. Pp. 211–217. (in Russian)
5. *Kondrashchenko V.I., Kharchevnikov V.I., Storodubtseva T.N., Bondarev B.A.* Drevesnosteklovoloknistyye kompozitsionnyye shpaly [Wood fiber composite sleepers]. Moscow, Sputnik+, 2009. 311 p. (in Russian)
6. *Zhelezobetonnyye shpaly dlya rel'sovogo puti* [Reinforced concrete sleepers for the rail track]. Moscow, Transport, 1980. 265 p. (in Russian)
7. *Ivanov A.N.* Problemy primeneniya polimernykh materialov v nesushchikh konstruksiyakh zheleznodorozhnykh mostov [Problems of the use of polymer composite materials in the supporting structures of railway bridges]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [The Siberian Transport University Bulletin]. 2020. No. 3. Pp. 29–37. (in Russian)
8. *Kondrashchenko V.I., Savin A.V., Van Ch.* Kompozitsionnyye podrel'sovyye osnovaniya. Konstruktsii [Composite underrail basements. Constructions]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials]. 2020. No. 10. Pp. 52–76. (in Russian)

9. *Ovchinnikov D.V., Pokatskiy V.A., Gallyamov D.I.* Opredeleniye modulya uprugosti podrel'sovogo osnovaniya zheleznodorozhnogo puti metodom konechnykh elementov [Determination of the elastic modulus of the under-rail foundation of a railway track by the finite element method]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2019. T. 1. Pp. 585–591. (in Russian)
10. Prochnost'. Ustoychivost'. Kolebaniya: Spravochnik: V 3 t. [Strength. Stability. Fluctuations]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1968. T. 1. 831 p. (in Russian)
11. *Storodubtseva T.N., Fedyanina N.V.* Kompozitsionnyy material na osnove otkhodov lesnogo kompleksa dlya zheleznodorozhnykh shpal [Composite material based on wood waste for complex railway sleepers]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. 2011. No. 5. Pp. 49–52. (in Russian)
