

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.173.6

О. М. ПАТЛАСОВ¹, С. О. ТОКАРСЬВ^{2*}

¹Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, ел. пошта am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{2*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, ел. пошта tokarevsergeyaleks@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2607-3123

РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ З'ЄДНАННЯ ЗБІРНОГО ДЕРЕВ'ЯНОГО БРУСА ДЛЯ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

Мета. Дефіцит матеріалів для елементів верхньої будови колії (ВБК) призводить до необхідності перегляду норм повторного використання старопридатних об'єктів після їх заміни або ремонту. Як приклад, можна привести наступний факт: після зношення в підрейковій зоні дерев'яних шпал і брусів або інших дефектів, які забороняють їх подальшу експлуатацію, гостро постає питання щодо їх планової заміни. Зазвичай, необхідний мінімальний запас шпал завжди є у розпорядженні обслуговуючих колію бригад. Що стосується дерев'яних брусів, довжина яких на стрілочному переводі досягає 5 м, – не завжди в короткий термін існує можливість оперативно їх замінити, зважаючи на відсутність даного типорозміру. Тому в роботі запропоновані та обґрунтовані геометричні розміри елементів з'єднання двох полубрусів або шпал в єдину жорстку конструкцію, яка за своїми характеристиками не відрізняється від суцільного бруса. **Методика.** Авторами розглянуто алгоритм розрахунку поєднання дерев'яних елементів та математичні моделі, які описують пружні властивості основи. Визначено найбільш адекватну методику, яка в повній мірі характеризує процеси взаємодії бруса у вигляді балки кінцевої довжини на баласті. **Результати.** Якісна й кількісна верифікація результатів показала дуже добрий збіг отриманих значень згинальних моментів, поперечних сил і прогинів методом кінцевих різниць (МКР) та аналітичним методом. Це дає підстави стверджувати, що отримані геометричні розміри нагельного з'єднання можна рекомендувати працівникам колійного господарства для поєднання дерев'яних шпал у брус на стрілочних переводах і навіть з'їздах. **Наукова новизна.** Дослідниками були обґрунтовані геометричні розміри нагельного з'єднання двох дерев'яних шпал у брус для застосування на стрілочних переводах. **Практична значимість.** Запропонована конструкція з'єднання дає можливість повторного застосування старопридатних відремонтованих дерев'яних шпал і брусів. Дану конструкцію можна застосовувати не тільки для поєднання звичайних дерев'яних шпал у брус потрібної довжини, а й для створення з полушпал єдиної конструкції для малонавантажених ділянок станційних і під'їзних колій.

Ключові слова: шпала; брус; пружна основа; нагельне з'єднання; метод кінцевих різниць

Вступ

Одним з пріоритетів розвитку залізничного транспорту України впродовж кількох останніх років є зменшення питомих витрат енергоресурсів та матеріалоемності основних фондів [14]. Цей напрямок стосується як Укрзалізниці в цілому, так і роботи його окремих господарств. Колійне господарство, як невід'ємна частина залізничного транспорту, за яким закріплена функція обслуговування та ремонту колійної інфраструктури, безпосередньо може вплинути на знос основних фондів всієї галузі. Зокрема залізничної колії, на долю якої припадає більше половини загальної вартості основних фондів залізниці [11].

Скоротити витрати на поточне утримання і ремонт колії та стрілочних переводів можна за рахунок нових ідей щодо удосконалення існуючих елементів і їх конструкцій [10]. Одним з таких напрямків є впровадження ресурсозберігаючих технологій з ремонту та укладання дерев'яних брусів.

Внаслідок великої вартості деревини виготовляти суцільні дерев'яні бруси, довжина яких досягає 5,00 м, достатньо дорого. До того ж термін зростання лісу, як сировини для виробництва, що належить до категорії не повністю поновлюваних ресурсів, складає приблизно 20–25 років, а виконання поточного утримання і ремонтів необхідне впродовж всього періоду експлуатації колії. Тому пропонується зменши-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ти витрати деревини при виготовленні брусів за рахунок поєднання нових або старопридатних відремонтованих шпал у брус за допомогою нагельного з'єднання, що складається з двох накладок та болтів, які об'єднують все в єдину конструкцію [4] (рис. 1).

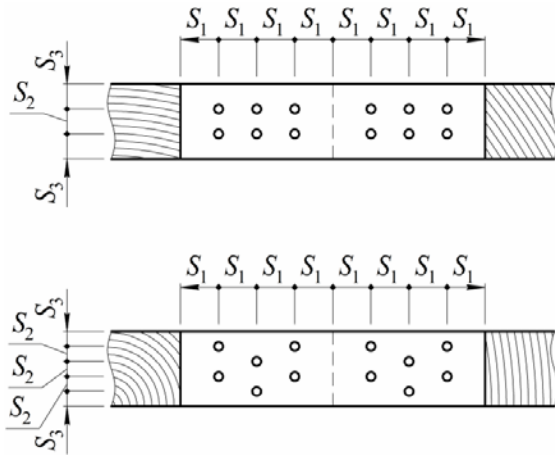


Рис. 1. Порядок розташування нагелів:
а – пряме розташування; б – розташування
в шаховому порядку

Fig. 1. The order of the nog:
a – direct location; b – staggered location

Мета

Утримання і ремонт колії у справному стані – одне з найголовніших пріоритетних завдань робітників колійного господарства. Від своєчасних та якісних заходів з відновлення основних функцій залізничної колії безпосередньо залежить не тільки безпека руху, а й регламент встановленого перевізного та пропускового процесу. Враховуючи вище сказане, необхідно запропонувати таку конструкцію з'єднання двох напівбрусів або шпал, яка б дозволила не тільки знизити витрати часу на ремонт та заміну, а й скоротити затрати матеріальних ресурсів.

Методика

Розрахунок нагельних з'єднань виконується за умовою міцності на:

- згин нагеля;
- зминання елементів з'єднання.

Несуча здатність циліндричного нагеля на один шов з'єднувальних елементів визначається за формулою [4]:

$$T = \min \begin{cases} T_{зг} = T_{зг}^0 \sqrt{m_n m_b k_a k_n}; \\ T_{зм} = T_{зм}^0 m_n m_b k_a k_n, \end{cases} \quad (1)$$

де $T_{зг}^0, T_{зм}^0$ – розрахункова несуча здатність циліндричного нагеля при згині та зминанні відповідно; m_n – коефіцієнт, який враховує породи деревини; m_b – коефіцієнт, який залежить від температурно-вологіх умов експлуатації; k_a – коефіцієнт напрямку дії навантаження; k_n – коефіцієнт, який залежить від типу нагеля.

Розрахункова несуча здатність нагеля в з'єднанні приймається найменшою зі значень $T_{зг}^0$ і $T_{зм}^0$. Для зменшення розтріскування шпал, які поєднуються у брус, оберемо шаховий порядок розташування нагеля (рис. 2).

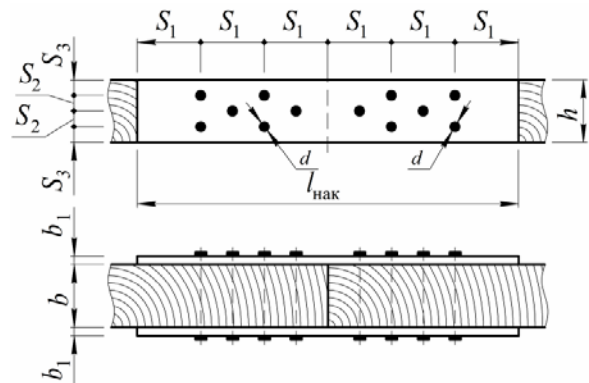


Рис. 2. Розрахункова схема
нагельного з'єднання двох шпал накладками

Fig. 2. Connection nog design scheme
of two elements by plates

Кількість нагелів (болтів) в з'єднанні визначається за формулою [4]:

$$n_n = N/T n_{ш} \geq 2, \quad (2)$$

де N – розрахункове зусилля; T – найменша розрахункова несуча здатність одного нагеля (болта) в з'єднанні; $n_{ш}$ – кількість розрахункових швів одного нагеля.

Число 2 в формулі (2) вказує на те, що кількість болтів не повинна бути менше ніж вказане значення.

Для сталевих циліндричних болтів $S_1=7d$, $S_2=3,5d$, $S_3=3d$ [4]. Відповідно до рис. 2 $h=2S_2+2S_3=13d$. При висоті обрізної шпали типу I $h=18$ см діаметр отворів повинен складати $d=14$ мм.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Далі необхідно визначити товщину накладок b_1 . Припустимо, що в стику з'єднання тільки накладки чинять опір прикладеному навантаженню. Тоді, використовуючи умову міцності при згині за найбільшими нормальними напруженнями (беручи до уваги, що поперечний переріз накладки має прямокутну форму), отримуємо товщину однієї накладки:

$$b_1 \geq 3M_{\max} / [\sigma] h^2, \quad (3)$$

де M_{\max} – максимальний згинальний момент; $[\sigma]$ – допустимі напруження в накладках. Для сталі, наприклад, марки Ст5 складає 200 МПа [1].

Максимальний згинальний момент можна визначити, розглянувши балку кінцевої довжини, яка лежить на суцільній пружній основі.

На сьогодні існує багато розрахункових моделей ґрунтової основи, які, наприклад в [12], чітко класифіковані та критично проаналізовані. Але для практичного застосування найчастіше застосовують однопара-метричну модель, яка заснована на гіпотезі Фусса-Вінклера [3, 8, 13, 17] і більш складну двопараметричну модель Власова і Пастернака [6, 17, 18].

Як показує досвід, для інженерного розрахунку, достатньо моделі Фусса-Вінклера [2]. Пов'язано це, перш за все, з тим, що баластний шар, на відміну від звичайного ґрунту, має набагато більший розмір частинок, і, відповідно, інший зв'язок між ними. Тому для подальшого аналізу розглядаємо модель пружної основи Фусса-Вінклера.

Оберемо систему координат балки (рис. 3), для якої приймемо наступне:

– розподілене навантаження q та зосереджена сила F додатні, якщо вони направлені вгору;

– згинальний зосереджений момент M додатний, якщо він направлений за годинниковою стрілкою.

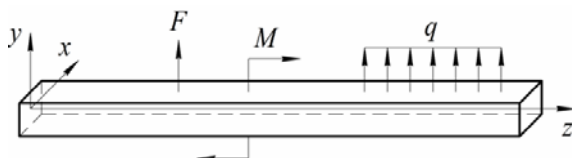


Рис. 3. Система координат балки на суцільній пружній основі

Fig. 3. The coordinate system of the beam on a continuous elastic foundation

Загальноприйнятні диференційні співвідношення для балки постійного перерізу на суцільній основі мають вигляд:

$$\varphi_z = \frac{dy(z)}{dz}; \quad (4)$$

$$-\frac{M_z}{EI} = \frac{d^2y(z)}{dz^2}; \quad (5)$$

$$-\frac{Q_z}{EI} = \frac{d^3y(z)}{dz^3}; \quad (6)$$

$$\frac{q_z - r_z}{EI} = \frac{d^4y(z)}{dz^4}, \quad (7)$$

де φ_z , Q_z , M_z , q_z – кут повороту, поперечна сила, згинальний момент та зовнішнє поперечне навантаження; EI – поперечна жорсткість балки; r_z – реактивний опір основи, який складає:

$$r = k y(z), \quad (8)$$

k – коефіцієнт пропорційності:

$$k = k_0 b, \quad (9)$$

k_0 – коефіцієнт постелі балки; b – ширина балки понизу.

Для розв'язання рівнянь (4)–(7) застосуємо наближений числовий метод – МКР. Підтвердження правильності отриманих результатів виконаємо за допомогою аналітичного методу, так званого методу граничних параметрів.

Перший метод заснований на заміні диференційного рівняння задачі системою лінійних алгебраїчних рівнянь через різницю значень функції в конкретних точках [9, 15]. Тобто значення похідної функції $y(z)$ в точці дорівнює відношенню різниці значень функції в сусідніх суміжних вузлових точках до відстані між вказаними вузловими точками:

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)_i \cong \left(\frac{\Delta y}{\Delta z}\right)_i \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2S}, \quad (10)$$

де S – крок (інтервал) між вузловими точками.

Використовуючи формулу (10), запишемо вирази для похідних більш високого порядку:

$$\left(\frac{d^2y}{dz^2}\right)_i \approx \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{S^2}; \quad (11)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$\left(\frac{d^3 y}{dz^3}\right)_i \approx \frac{y_{i+2} - 2y_{i+1} + 2y_{i-1} - y_{i-2}}{2S^3}; \quad (12)$$

$$\left(\frac{d^4 y}{dz^4}\right)_i \approx \frac{y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2}}{S^4}. \quad (13)$$

Враховуючи (7) та (13), остаточно отримаємо рівняння, яке безпосередньо пов'язує прогини з навантаженням у вузлах:

$$y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2} = \frac{(q_i - r_i)S^4}{EI}, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n). \quad (14)$$

Розіб'ємо балку на n рівних частин (рис. 4).

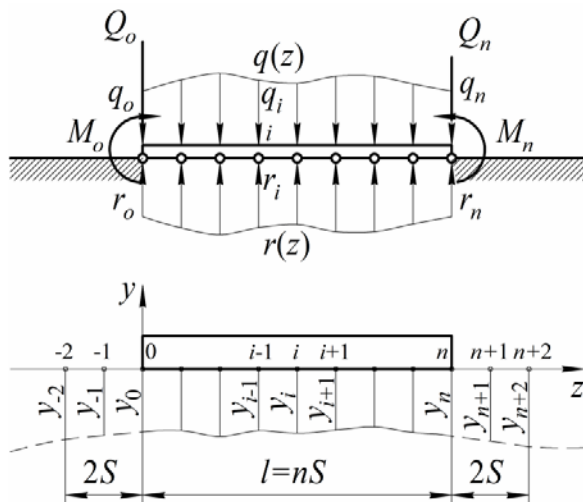


Рис. 4. Дискретизація балки на суцільній пружній основі:
а – загальна схема можливого навантаження кінців;
б – умовна лінія прогинів під навантаженням

Fig. 4. The beam discretization on a continuous elastic foundation:
а – general scheme of possible load on the beam ends;
б – conventional deflection line from the load

Якщо записати рівняння для кожної контактної точки, то отримаємо $n+1$ лінійних алгебраїчних рівнянь з $n+5$ невідомими.

Значення прогинів за кінцями балки y_{-2} , y_{-1} , y_{n+1} , y_{n+2} , встановлюються на підставі граничних умов закріплення балки та врахуванням вищезгаданих виразів.

– для точки 0

$$y_2 - 4y_1 + 6y_0 - 4y_{-1} + y_{-2} = \frac{(q_0 - r_0)S^4}{EI};$$

– для точки 1

$$y_3 - 4y_2 + 6y_1 - 4y_0 + y_{-1} = \frac{(q_1 - r_1)S^4}{EI};$$

– для точки $n-1$

$$y_{n+1} - 4y_n + 6y_{n-1} - 4y_{n-2} + y_{n-3} = \frac{(q_{n-1} - r_{n-1})S^4}{EI};$$

– для точки n

$$y_{n+2} - 4y_{n+1} + 6y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2} = \frac{(q_n - r_n)S^4}{EI}.$$

При $z=0$, $M=M_0$, $Q=Q_0$

$$y_{-1} = -\frac{M_0 S^2}{EI} + 2y_0 - y_1;$$

$$y_{-2} = \frac{2S^2}{EI}(Q_0 S - M_0) + 4y_0 - 4y_1 + y_2. \quad (15)$$

При $z=l$, $M=M_n$, $Q=Q_n$

$$y_{n+1} = -\frac{M_n S^2}{EI} - y_{n-1} + 2y_n;$$

$$y_{n+2} = -\frac{2S^2}{EI}(Q_n S + M_n) + y_{n-2} - 4y_{n-1} + 4y_n. \quad (16)$$

У випадку, коли кінці балки ненавантажені, тобто $M=M_0=M_n=0$ та $Q=Q_0=Q_n=0$, значення прогинів можуть бути визначені у матричному вигляді:

$$\{y\} = [A]^{-1} \frac{S^4}{EI} (\{q\} - \{r\}), \quad (17)$$

де $\{y\} = \{y_0, y_1, \dots, y_n\}$ – вектор невідомих прогинів в кожній контактній точці; $[A]$ – матриця, елементами якої виступають значення при невідомих прогинах y ; $\{q\} = \{q_0, q_1, \dots, q_n\}$ – вектор зовнішнього навантаження в вузлах балки; $\{p\} = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ – вектор реактивного тиску у відповідних вузлах балки.

За визначеними значеннями величин прогинів в кожній точці встановлюються відповідні кути повороту, згинальні моменти та поперечні сили.

Розглянемо аналітичний метод (АМ). Для балки, яка лежить на пружній основі, рівняння пружної лінії має вигляд [13]

$$EI_x y_z = EI_x y_o A_z + EI_x \frac{\varphi_o}{\beta} B_z + \frac{M_o}{\beta^2} C_z + \frac{Q_o}{\beta^3} D_z + EI_x f(\beta z), \quad (18)$$

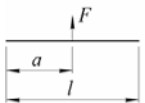
де y_o – прогин в лівому перерізі; φ_o – кут повороту лівого перерізу; M_o, Q_o – згинальний момент та поперечна сила для лівого перерізу відповідно; $f(\beta z)$ – вплив навантаження, яке знаходиться в межах балки (табл. 1).

Таблиця 1

Функції $f(\beta \cdot z)$ та їх похідні

Table 1

Functions $f(\beta \cdot z)$ and their derivatives

Схема завантаження	Значення функції			
	$f(\beta \cdot z)$	$f'(\beta \cdot z)$	$f''(\beta \cdot z)$	$f'''(\beta \cdot z)$
	$\frac{FD_{z-a}}{\beta^3}$	$\frac{FC_{z-a}}{\beta^2}$	$\frac{FB_{z-a}}{\beta}$	FA_{z-a}

A_z, B_z, C_z, D_z – гіпербол-тригонометричні функції (функції Крилова), які визначаються за формулами [13]:

$$A_z = \text{ch}(\beta z) \cos(\beta z);$$

$$B_z = \frac{1}{2} [\text{ch}(\beta z) \sin(\beta z) + \text{sh}(\beta z) \cos(\beta z)];$$

$$C_z = \frac{1}{2} \text{sh}(\beta z) \sin(\beta z);$$

$$D_z = \frac{1}{4} [\text{ch}(\beta z) \sin(\beta z) - \text{sh}(\beta z) \cos(\beta z)], \quad (19)$$

де β – основна характеристика рівняння згину бруса як балки на пружній основі, см^{-1} ;

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI_x}}. \quad (20)$$

Для отримання рівняння кутів повороту продиференціюємо рівняння (18), використовуючи дані табл. 2.

Таблиця 2

Функції A_z, B_z, C_z, D_z і їх похідні до розрахунку балок на суцільній пружній основі

Table 2

 A_z, B_z, C_z, D_z functions and their derivatives for calculating continuous beams on elastic foundation

Функції	Похідні			
	Перша	Друга	Третя	Четверта
A_z	$-4\beta D_z$	$-4\beta^2 C_z$	$-4\beta^3 B_z$	$-4\beta^4 A_z$
B_z	βA_z	$-4\beta^2 D_z$	$-4\beta^3 C_z$	$-4\beta^4 B_z$
C_z	βB_z	$\beta^2 A_z$	$-4\beta^3 D_z$	$-4\beta^4 C_z$
D_z	βC_z	$\beta^2 B_z$	$\beta^3 A_z$	$-4\beta^4 D_z$

$$EI_x \varphi_z = -4EI_x \beta y_o D_z + EI_x \varphi_o A_z + \frac{M_o}{\beta} B_z + \frac{Q_o}{\beta^2} C_z + EI_x f'(\beta \cdot z). \quad (21)$$

Рівняння для згинальних моментів та поперечних сил отримаємо, продиференціювавши вираз (18) двічі і тричі відповідно, а також помноживши на EI (оскільки жорсткість при згинанні входить до диференційного рівняння зігнутої осі балки):

$$M_z = -4EI_x \beta^2 y_o C_z - 4EI_x \beta \varphi_o D_z + M_o A_z + \frac{Q_o}{\beta} B_z + EI_x f''(\beta \cdot z); \quad (22)$$

$$Q_z = -4EI_x \beta^3 y_o B_z - 4EI_x \beta^2 \varphi_o C_z - 4\beta M_o D_z + Q_o A_z + EI_x f'''(\beta \cdot z). \quad (23)$$

Брус завантажений двома зосередженими силами Q_1 і Q_2 та реакціями ненавантажених рейок R_1 і R_2 (рис. 5). Прийемо, що на обидві рейкові нитки передаються однакові навантаження:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{\beta \cdot l_6}{2} P_{\text{екв}}^{\text{II}}, \quad (24)$$

де l_6 – відстань між опорами; $P_{\text{екв}}^{\text{II}}$ – сила, що еквівалентна від дії усіх коліс екіпажа [2].

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

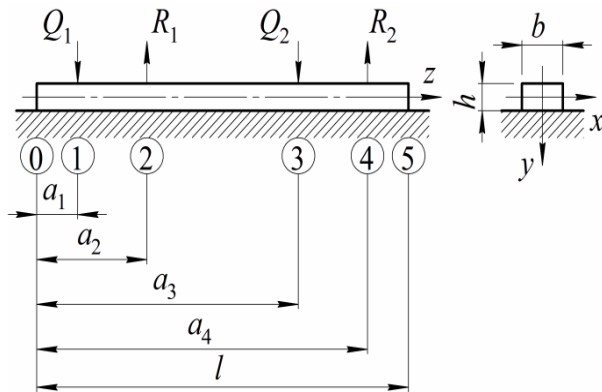


Рис. 5. Схема дії сил на дерев'яний брус

Fig. 5. The action of forces on a wooden beam

Реакції ненавантажених рейок можна врахувати таким чином [5]:

$$R = -K_k y_o c b l, \quad (25)$$

де K_k – коефіцієнт, який враховує конструктивні зв'язки ненавантаженої рейкової нитки та пружної основи; y_o – прогин бруса в перерізі під ненавантаженою ниткою від впливу сил на навантажені рейки; c – коефіцієнт постелі бруса; l – довжина бруса.

Розіб'ємо брус на 5 ділянок (рис. 5), щоб границі кожної з них закінчувались зміною навантаження (тобто визначались прикладеними силловими факторами).

Необхідно записати рівняння y_z, φ_z, M_z, Q_z для кожної окремої ділянки бруса, тобто для ділянок 0–1, 1–2, 2–3, 3–4 та 4–5, але такий запис буде мати багато рівнянь. Оскільки балка лежить вільно на пружній основі, тому граничні умови для цього закріплення зліва:

$$\begin{aligned} Q_o &= Q|_{x=0} = 0; \\ M_o &= M|_{x=0} = 0; \\ \varphi_o &= \varphi|_{x=0} \neq 0; \\ y_o &= y|_{x=0} \neq 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Запишемо універсальні рівняння для усього бруса:

$$\left\{ \begin{aligned} EI_x y_z &= EI_x y_o A_z + EI_x \frac{\varphi_o}{\beta} B_z + \\ &+ \frac{1}{\beta^3} \sum_{\forall a_i < z} F_i D_{z-a_i}; \\ EI_x \varphi_z &= -4EI_x \beta y_o D_z + EI_x \varphi_o A_z + \\ &+ \frac{1}{\beta^2} \sum_{\forall a_i < z} F_i C_{z-a_i}; \\ M_z &= -4EI_x \beta^2 y_o C_z - 4EI_x \beta \varphi_o D_z + \\ &+ \frac{1}{\beta} \sum_{\forall a_i < z} F_i B_{z-a_i}; \\ Q_z &= -4EI_x \beta^3 y_o B_z - 4EI_x \beta^2 \varphi_o C_z + \\ &+ \sum_{\forall a_i < z} F_i A_{z-a_i}, \end{aligned} \right. \quad (27)$$

де F_i – поперечні сили, що діють на брус.

Запишемо частинний розв'язок диференційного рівняння (18) для випадку, зображеного на рис. 5, враховуючи величини R_1 і R_2 , і включимо в рівняння індекси характерних перерізів «2», «3», «4» та «5», в межах яких діє прикладене навантаження:

$$\begin{aligned} EI_x f(\beta \cdot z) &= -\frac{1}{\beta^3} \left(Q_1 D_{z-a_1} \Big|_2 - \right. \\ &\left. - R_1 D_{z-a_2} \Big|_3 + Q_2 D_{z-a_3} \Big|_4 - R_2 D_{z-a_4} \Big|_5 \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Визначимо дві інші граничні умови для цієї розрахункової схеми, маючи на увазі, що правий кінець балки також не закріплений. Отже, при $Q_o = Q|_{x=l} = 0$, $M_o = M|_{x=l} = 0$, $\varphi_o \neq \varphi|_{x=l} \neq 0$ та $y_o \neq y|_{x=l} \neq 0$ з двох останніх рівнянь системи (27) отримаємо y_o і φ_o :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} EI_x y_o \\ EI_x \varphi_o \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -4\beta^2 C_l & -4\beta D_l \\ -4\beta^3 B_l & -4\beta^2 C_l \end{bmatrix}^{-1} \times \\ &\times \begin{bmatrix} -\frac{1}{\beta} \sum_{\forall a_i < z} F_i B_{l-a_i} \\ -\sum_{\forall a_i < z} F_i A_{l-a_i} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (29)$$

Як приклад, розпишемо для кожної ділянки бруса остаточні рівняння визначення згинальних моментів:

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$z \in [0 \ a_1): M_z = -4EI_x \beta^2 y_o C_z - 4EI_x \beta \phi_o D_z$$

$$z \in [a_1 \ a_2): M_z = -4EI_x \beta^2 y_o C_z - 4EI_x \beta \phi_o D_z -$$

$$-\frac{1}{\beta^3} Q_1 D_{z-a_1}$$

$$z \in [a_2 \ a_3): M_z = -4EI_x \beta^2 y_o C_z - 4EI_x \beta \phi_o D_z -$$

$$-\frac{1}{\beta^3} (Q_1 D_{z-a_1} - R_1 D_{z-a_2})$$

$$z \in [a_3 \ a_4): M_z = -4EI_x \beta^2 y_o C_z - 4EI_x \beta \phi_o D_z -$$

$$-\frac{1}{\beta^3} (Q_1 D_{z-a_1} - R_1 D_{z-a_2} + Q_2 D_{z-a_3})$$

$$z \in [a_4 \ l): M_z = -4EI_x \beta^2 y_o C_z - 4EI_x \beta \phi_o D_z -$$

$$-\frac{1}{\beta^3} (Q_1 D_{z-a_1} - R_1 D_{z-a_2} + Q_2 D_{z-a_3} - R_2 D_{z-a_4})$$

Розрахунки колії на міцність для визначення максимально ймовірних сил, що передаються від рейок на брус, в цій роботі виконані для найбільш розповсюджених типів рухомого складу відповідно до затверджені методики [2]:

- вантажний локомотив ВЛ8;
- пасажирський локомотив ЧС7;
- вантажний вагон з чотиривісними візками ЦНІИ–Х3–О.

Розрахунки показали, що на брус від підкладки під рухомим складом при вертикальному модулі пружності $U=46$ МПа передаються такі навантаження:

- ВЛ8 – $Q=55$ кН, при $V=80$ км/год;
- ЧС7 – $Q=58$ кН, при $V=140$ км/год;
- вантажний вагон з візками ЦНІИ–Х3–О – $Q=61$ кН при $V=90$ км/год.

Бачимо, що найбільш суттєво впливає вантажний вагон з візками ЦНІИ–Х3–О, отже, остаточно у подальших розрахунках приймаємо саме цей рухомий склад.

Під час теоретичних досліджень було виявлено, що величини найбільших згинальних моментів в межах стрілочного перевалу виникають під брусами довжиною 3,5 м. Результати розрахунку згинальних моментів для вказаної довжини бруса МКР і аналітичним методом наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку згинальних моментів МКР та аналітичним методом

Table 4

The calculation results of bending moments by finite difference and analytical methods

z	$M_{МКР}$, кН·м	$M_{АМ}$, кН·м	$ \Delta M $, %
0,00	0,00	0,00	-
0,28	1,87	1,93	2,96
0,55	7,38	7,62	3,10
0,55	7,38	7,62	3,10
0,75	1,74	1,80	3,44
0,95	-2,19	-2,25	2,84
1,15	-4,59	-4,69	2,22
1,35	-5,43	-5,64	3,76
1,35	-5,43	-5,64	3,76
1,75	0,60	0,62	2,68
2,15	11,87	12,18	2,55
2,15	11,87	12,18	2,55
2,35	7,36	7,62	3,36
2,55	3,95	4,11	3,99
2,75	1,40	1,45	3,51
2,95	-0,61	-0,63	2,79
2,95	-0,61	-0,63	2,79
3,23	-0,26	-0,27	3,88
3,50	0,00	0,00	-

Бачимо, що різниця результатів двох методів складає не більше ніж 5 %, що знаходиться в межах похибки при інженерному розрахунку. Числова верифікація свідчить про адекватність виконаних розрахунків.

Для наочності отриманих результатів для аналітичного методу побудуємо епюри прогинів, кутів повороту, згинальних моментів та поперечних сил (рис. 6–9).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

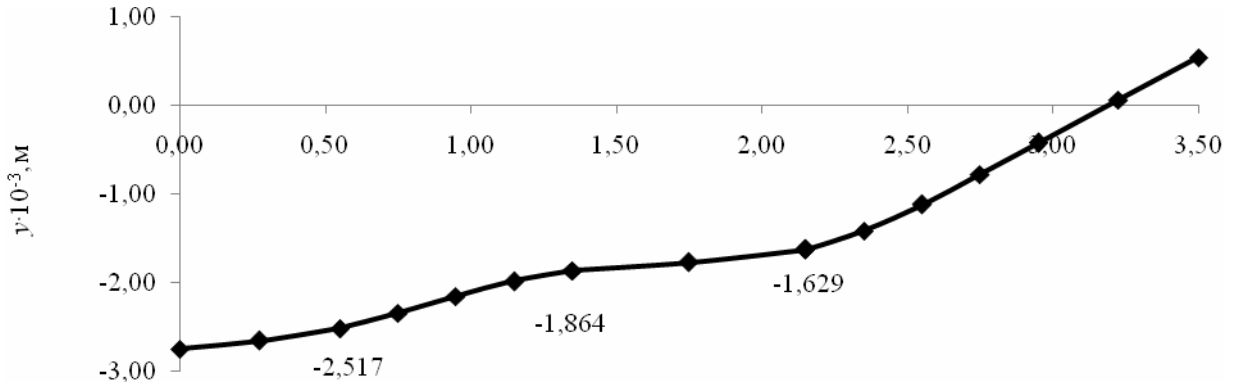


Рис. 6. Епюра прогинів $y(z)$

Fig. 6. The diagram of deflections $y(z)$

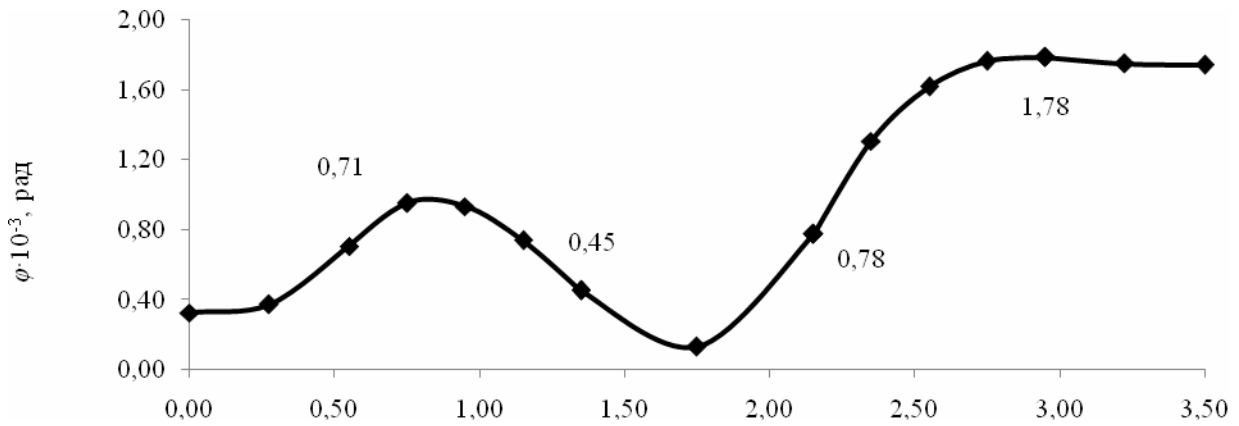


Рис. 7. Епюра кутів повороту $\varphi(z)$

Fig. 7. The diagram of rotation angles $\varphi(z)$

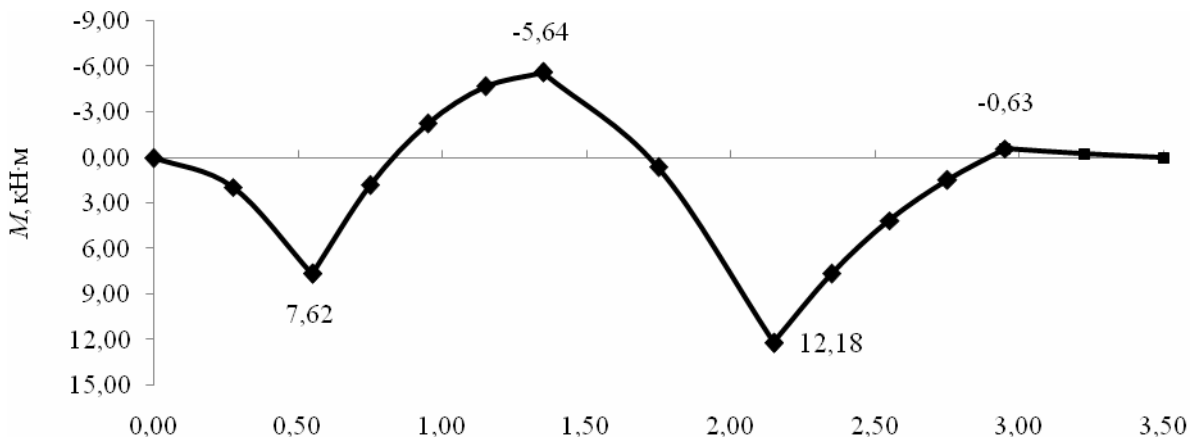
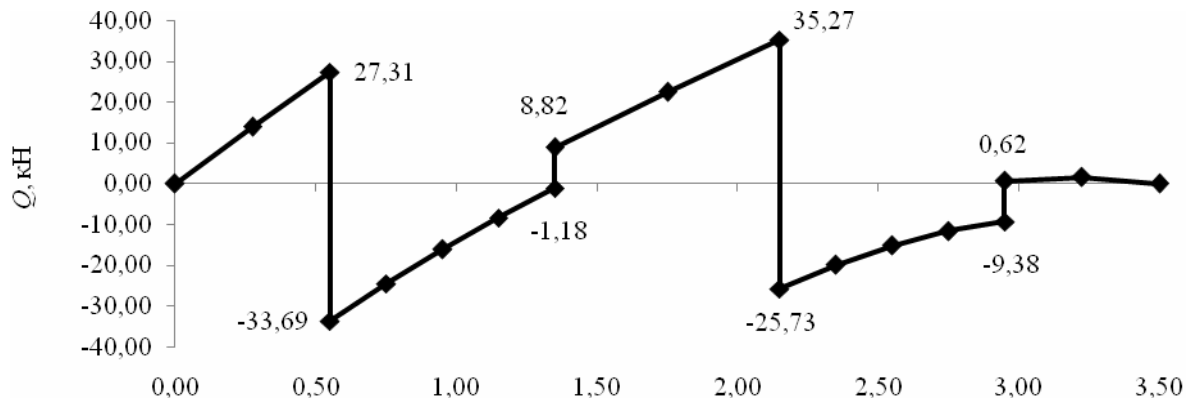


Рис. 8. Епюра згинальних моментів $M(z)$

Fig. 8. The diagram of bending moments $M(z)$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Рис. 9. Епюра поперечних сил $Q(z)$ Fig. 9. The diagram of shear forces $Q(z)$

При $M_{\max} = 12,18$ кН·м, $[\sigma] = 200$ МПа і $h = 0,18$ м товщина накладки згідно з формулою (3) дорівнює:

$$b_1 = \frac{3 \cdot 12,18}{200 \cdot 0,18^2} = 0,57 \text{ см} \approx 0,6 \text{ см.}$$

Згідно з [4] несуча здатність одного шва болтів

- згин болта $T_{\text{зг}}^0 = 1,8d^2 + 0,02a^2 \leq 2,5d^2$;
- змінання в середніх елементах конструкції $T_{\text{зм}}^{\text{сеп}} = 0,5cd$; $c = b = 25$ см;
- змінання в крайніх елементах з'єднання $T_{\text{зм}}^{\text{кр}} = 0,8ad$, $a = b_1 = 0,6$ см. Оскільки крайні елементи вузла сталеві, тому врахувати їх несучу здатність на змінання не потрібно.

$$T_{\text{зг}}^0 = 3,53 \text{ кН} \leq 4,90 \text{ кН};$$

$$T_{\text{зм}}^{\text{сеп}} = 17,5 \text{ кН.}$$

Розрахункова несуча здатність з врахуванням породи деревини і температурно-вологих умов:

- згин болта

$$T_{\text{зг}} = 3,53 \sqrt{1 \cdot 0,85} = 3,41 \text{ кН};$$

- змінання в середніх елементах

$$T_{\text{зм}}^{\text{сеп}} = 17,5 \cdot 1,1 \cdot 0,85 = 16,36 \text{ кН};$$

$$n_{\text{н}} = 1,868 \leq 2.$$

Приймаємо два болти діаметром 14 мм.

Для більшої жорсткості накладки центральний ряд болтів збільшимо на 1. Згідно з рис. 2 будемо мати:

$$l_{\text{нак}} = 6 \cdot S_1 = 42d = 588 \text{ мм.}$$

В ході теоретичних досліджень було проаналізовано вплив модуля пружності підрейкової основи на товщину накладки з'єднання, який показав, що зміна проходить за нелінійним законом (рис. 10). Збільшення модуля пружності в чотири рази призводить до зменшення величини товщини накладки всього на 1–1,5 мм. Тому пропонується остаточно прийняти $b_1 = 6$ мм.

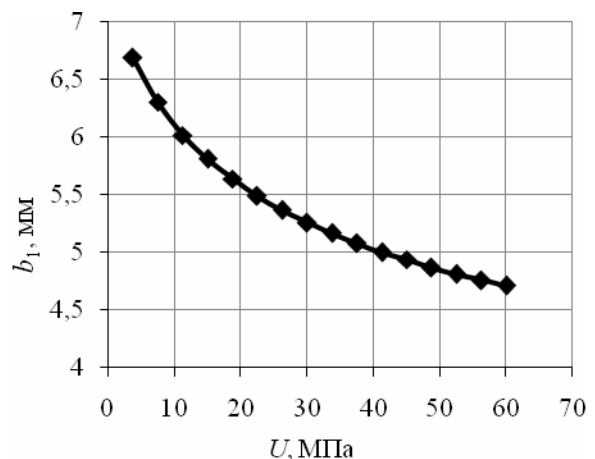


Рис. 10. Вплив модуля пружності підрейкової основи на товщину накладки

Fig. 10. Influence of elastic modulus of the rail foundation on the pad thickness

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Отже, спираючись на результати теоретичних досліджень в цій статті, доцільно переглянути додаток 5 [7], і внести зміни щодо розмірів накладки для поєднання двох шпал у брус.

Результати

Порівняння розрахованих за допомогою аналітичного методу і МКР значень показує незначну абсолютну похибку, що знаходиться в межах похибки інженерних розрахунків. Числова верифікація двох методів підтверджує правильність отриманих результатів. Отже, з конструктивних міркувань на допуски у виготовленні, нагельне з'єднання буде мати вигляд, зображений на рис. 11.

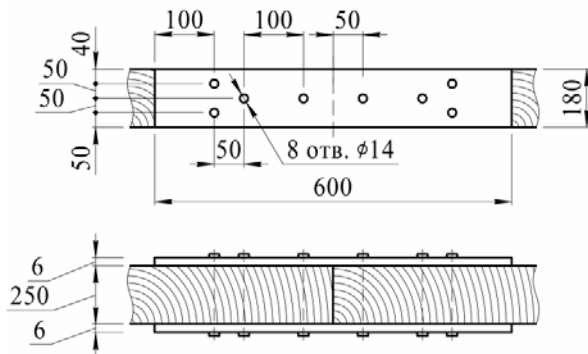


Рис. 11. Остаточні геометричні розміри нагельного з'єднання

Fig. 11. The final geometrical sizes of nog connection

Таким чином, можна вважати, що запропонована конструкція нагельного з'єднання двох шпал у брус відповідає умовам міцності для максимального експлуатаційного навантаження.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано конструкцію з'єднання двох нових або відремонтованих шпал у єдиний жорсткий брус.

Теоретичні результати дослідження засвідчили, що цю конструкцію за умовами міцності можна використовувати незалежно від модуля пружності. За рахунок впровадження та використання таких елементів можна досягти значних фінансових і матеріальних заощаджень.

Висновки

Розглянуто методику поєднання двох дерев'яних елементів за допомогою нагельного з'єднання.

1. Досліджено декілька варіантів розрахунку величин поперечних зусиль та переміщень.

2. Виконано якісну і кількісну верифікацію. Результати засвідчили адекватність розрахунків МКР та аналітичним методом.

3. Запропоновано остаточні геометричні розміри накладки для з'єднання.

4. Надано пропозиції щодо внесення змін та доповнень до додатку 5 Інструкції з улаштування та утримання колії залізниць України [7].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горский, А. И. Определение допускаемых напряжений при расчете на прочность / А. И. Горский, Е. Б. Иванов-Эмин, А. И. Кареновский. – Москва : НИИмаш, 1974. – 95 с.
2. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП – 0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2005. – 119 с.
3. Данович, В. Д. Анализ работы подшпального основания под действием динамической загрузки / В. Д. Данович, В. Я. Закапко, А. М. Патласов // Транспорт : зб. наук. пр. // Дніпропетр. ін-т інженерів трансп. – Дніпропетровськ, 1999. – Вип. 4. – С. 23–30.
4. ДБН В.2.6–161:2010. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – На заміну СНиП II–25–80 : затв. наказом Мінрегіонбуду України від 15.11.2010 р. № 448 та надано чинності 30.12.2010 р. № 571 з 2011–09–01. — Київ, 2011. – 284 с.
5. Железобетонные шпалы для рельсового пути / А. Ф. Золотарский, Б. А. Евдокимов, Н. М. Исаяев [и др.]. – Москва : Транспорт, 1980. – 270 с.
6. Идимешев, С. В. Расчет напряженно-деформированного состояния изотропных прямоугольных пластин на упругом основании / С. В. Идимешев // Изв. Алтайск. гос. ун-та. – 2014. – Вып. № 1 (81), т. 1. – С. 53–56.
7. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП-0269 / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, М. Б. Курган [та ін.]. – Київ : Поліграфсервіс, 2012. – 465 с.
8. Курган, Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Наука та прогрес трансп. Вісн.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: 10.15802/stp-2015/38250.
9. Лебедев, А. В. Численные методы расчета строительных конструкций : учеб. пособие / А. В. Лебедев. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2012. – 55 с.
 10. Марценюк, Л. В. Послідовність та етапність проведення реформ на залізничному транспорті / Л. В. Марценюк // Проблеми економіки трансп : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 1. – С. 88–95.
 11. Рудаков, О. Г. Державна програма реформування залізничного транспорту на 2009-2015 роки: проблеми та шляхи вирішення / О. Г. Рудаков // Укр. соціум. – 2010. – Вип. 2. – С. 133–143.
 12. Сикаченко, В. М. К вопросу о классификации расчетных моделей грунтовых оснований / В. М. Сикаченко // Дороги и мосты : сборник / ФГУП РОСДОРНИИ. – Москва, 2008. – Вып. 19/1. – С. 70–85.
 13. Строительная механика. Основы теории с примерами расчетов / А. Е. Саргсян, А. Т. Демченко, Н. В. Дворянчиков, Г. А. Джинчвелашвили. – Москва : Высш. шк., 2000. – 416 с.
 14. Транспортна стратегія України на період до 2020 року [Електронний ресурс] : схвалено розпорядж. Каб. Міністрів України від 20 жовт. 2010 р. № 2174-р. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80>. – Назва з екрана. – Перевірено : 4.11.2015.
 15. Al-Azzawi, A. A. Large Deflection of Deep Beams on Elastic Foundations / A. A. Al-Azzawi, D. M. Theeban. – J. of the Serbian Society for Computational Mechanics. – 2010. – Vol. 4, № 1. – P. 88–101.
 16. Dinev, D. Analytical solution of beam on elastic foundation by singularity functions / D. Dinev // Engineering Mechanics. – 2012. – Vol. 19, № 6. – P. 381–392.
 17. Reliability analysis of beams on random elastic foundations / D. V. Griffiths, J. Paiboon, J. Huang, G. A. Fenton // Geotechnique. – 2013. – Vol. 63. – Iss. 2. – P. 180–188. doi: 10.1680/geot.11.P.127.
 18. Teodoru, I. B. A Finite Element Study of the Bending Behavior of Beams Resting on Two-Parameter Elastic Foundation / I. B. Teodoru, V. Musat, M. Vrabie // Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Tomul LII (LVI), Fasc. 3–4. – 2006. – P. 7–20.

А. М. ПАТЛАСОВ¹, С. А. ТОКАРЕВ^{2*}

¹Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта am_patlasov@ukr.net ORCID 0000-0003-2081-5648

^{2*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта tokarevsergeyaleks@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2607-3123

РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ СОЕДИНЕНИЯ СБОРНОГО ДЕРЕВЯННОГО БРУСА ДЛЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

Цель. Дефицит материалов для элементов верхнего строения пути (ВСП) приводит к необходимости пересмотра норм повторного использования старогодных объектов после их замены или ремонта. В качестве примера можно привести следующий факт: после износа в подрельсовой зоне деревянных шпал и брусьев или других дефектов, которые запрещают их дальнейшую эксплуатацию, остро стоит вопрос их плановой замены. Обычно необходимый минимальный запас шпал всегда находится в распоряжении обслуживающих путь бригад. Что касается деревянных брусьев, длина которых на стрелочном переводе достигает 5 м, – не всегда в короткий срок существует возможность оперативно их заменить ввиду отсутствия данного типоразмера. Поэтому в работе предложены и обоснованы геометрические размеры элементов соединения двух полубрусьев или шпал в единую жесткую конструкцию, которая по своим характеристикам не отличается от сплошного бруса. **Методика.** Авторы рассматривали алгоритм расчета соединения деревянных элементов и математические модели, описывающие упругие свойства основания. Определена наиболее адекватная методика, которая в полной мере характеризует процессы взаимодействия бруса в виде балки конечной длины на балласте. **Результаты.** Качественная и количественная верификация результатов показала очень хорошее совпадение полученных значений изгибающих моментов, поперечных сил и прогибов методом конечных разностей (МКР) и аналитическим методом. Это дает основания утверждать, что полученные геометриче-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ские размеры нагельного соединения можно рекомендовать работникам путевого хозяйства для соединения деревянных шпал в брус на стрелочных переводах и даже съездах. **Научная новизна.** Обоснованы геометрические размеры нагельного соединения двух деревянных шпал в брус для применения на стрелочных переводах. **Практическая значимость.** Предложенная конструкция соединения дает возможность повторного применения старогодных отремонтированных деревянных шпал и брусьев. Данную конструкцию можно применять не только для соединения обычных деревянных шпал в брус нужной длины, но и для создания из полушпал единой конструкции для малонагруженных участков станционных и подъездных путей.

Ключевые слова: шпала; брус; упругое основание; нагельное соединение; метод конечных разностей

O. M. PATLASOV¹, S. O. TOKARIEV^{2*}

¹Dep. «Railway Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{2*}Dep. «Railway Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail tokarevsrgeyaleks@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2607-3123

THE COUPLING ELEMENT CALCULATION OF COMBINED WOODEN BAR FOR TURNOUTS

Purpose. The deficit of permanent way (PW) material elements leads to a revision of the re-use of old serviceable object after their replacement or repair. As an example is the following fact, that after the wear in the under-rail area of wooden sleepers and beams, or other defects that prevent their further exploitation, there is an acute issue of their planned replacement. Usually, the required minimum margin of sleepers is always in the track service brigades. As for the wooden beams the length of which in the turnouts is up to 5 m, there is not always possible quickly replace them due to the lack of size in the short term. Therefore, the geometric dimensions of the connect elements of the two halves of the beams or sleepers in a single rigid structure were proposed and justified and its characteristics do not differ from solid beam. **Methodology.** The authors considered the calculation algorithm of wooden elements connection and mathematical models that describe the elastic properties of base. The most adequate technique that fully characterizes the interactions beam in the form of a beam of finite length on the ballast was determined. **Findings.** The qualitative and quantitative verification of the results showed a very good agreement between the values of bending moments, shear forces and deflections that were obtained by the finite difference method (FDM) and the analytical method. It gives the reason to believe that the received geometric dimensions of nag connection can be recommended to employees of track facilities to connect the wooden sleepers on the switches and crossovers. **Originality.** The nag connection geometrical sizes of two wooden sleepers in the beam for using on switches were substantiated. **Practical value.** The proposed joint design allows re-using of renovated old wooden sleepers and bars. This design can be applied not only for the connection of conventional wooden sleepers in the beam of desired length, but also to create the halves of a single sleeper designs for lightly loaded sections of the station and access routes.

Keywords: sleeper; beam; elastic foundation; nag connection; finite difference method

REFERENCES

1. Gorskiy A.I., Ivanov-Emin Ye.B., Karenovskiy A.I. *Opredeleeniye dopuskayemykh napryazheniy pri raschete na prochnost* [Definition of allowable stress when calculating the strength]. Moscow, NIImash Publ., 1974. 95 p.
2. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist: TsP-0117* [Rules of calculations of the railway track strength and stability: TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2005. 119 p.
3. Danovich V.D., Zakapko V.Ya., Patlasov A.M. Analiz raboty podshpalnogo osnovaniya pod deystviyem dinamicheskoy zagruzki [Analysis of under sleeper base under the dynamic loading]. *Transport: Zbirnyk naukovykh prats DIITu* [Transport: Proc. of Dnipropetrovsk Institution of Transport Engineers], 1999, vol. 4, pp. 23-30.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

4. *DBN V.2.6–161:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Dereviani konstruktsii. Osnovni polozhennia* [State building standart V. 2.6-161:2010. Design of buildings and structures. A wooden structure. The main provisions]. Kyiv, 2011. 284 p.
5. Zolotarskiy A.F., Yevdokimov B.A., Isayev N.M. *Zhelezobetonnye shpaly dlya relsovogo puti* [Concrete sleepers for rail track]. Moscow, Transport Publ., 1980. 270 p.
6. Idimeshev S.V. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izotropnykh pryamougolnykh plastin na uprugom osnovanii [The calculation of stress-strain state of isotropic rectangular plates on elastic foundation]. *Izvestiya altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [News of Altai State University]. Barnaul, 2014, no.1 (81), vol. 1, pp. 53-56.
7. Danilenko E.I., Orlovskiy A.M., Kurhan M.B., Yakovliev V.O. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy: TsP-0269* [Instruction for installation and maintenance of the tracks of the Railways of Ukraine of the TsP-0269]. Kyiv, Polihrafservis Publ., 2012. 465 p.
8. Kurhan, D.M. Do vyreshennia zadach rozrakhunku kolii na mitsnist iz urakhuvanniam nerivnopruzhnosti pidreikovoї osnovy [To the solution of problems about the railways calculation for strength taking into account unequal elasticity of the subrail base]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 1 (55), pp. 90-99. doi: 10.15802/stp2015/38250.
9. Lebedev A.V. *Chislennyye metody rascheta stroitelnykh konstruktsiy* [Numerical methods of calculation of building structures]. Saint-Petersburg, SPbGASU Publ., 2012. 55 p.
10. Martseniuk L.V. Poslidovnist ta etapnist provedennia reform na zaliznychnomu transporti [The sequence and phasing of reforms in railway transport]. *Problemy ekonomiky transportu: zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [The problems of the transport economy: Roc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, vol. 1, pp. 88-95.
11. Rudakov O.H. Derzhavna prohrama reformuvannia zaliznychnoho transportu na 2009–2015 roky: problemy ta shliakhy vyrishennia [The state program of reforming railway transport for the period 2009-2015: problems and solutions]. *Ukrainskyi sotsium – Ukrainian Society*, 2010, vol. 2, pp. 133-143.
12. Sikachenko V.M. K voprosu o klassifikatsii raschetnykh modeley gruntovykh osnovaniy [To the question of classification of computational models of soil bases]. *Dorogi i mosty* [Ways and bridges]. Moscow, 2008, vol. 19/1, pp. 70-85.
13. Sargsyan A.Ye., Demchenko A.T., Dvoryanchikov N.V., Dzhinchvelashvili G.A. *Stroitel'naya mekhanika. Osnovy teorii s primerami raschetov* [Building mechanics. Basic theory with examples of calculations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 416 p.
14. *Transportna stratehiia Ukrainy na period do 2020 roku* [The transport strategy of Ukraine for the period till 2020]. Available at: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80> (Accessed 4 November 2015).
15. Al-Azzawi A.A., Theeban D.M. Large Deflection of Deep Beams on Elastic Foundations. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 88-101
16. Dinev D. Analytical solution of beam on elastic foundation by singularity functions. *Engineering Mechanics*, 2012, vol. 19, no. 6, pp. 381-392.
17. Griffiths D.V., Paiboon J., Huang J., Fenton G.A. Reliability analysis of beams on random elastic foundations. *Geotechnique*, 2013, vol. 63, issue 2, pp. 180-188. doi: 10.1680/geot.11.P.127.
18. Teodoru I.B., Musat V., Vrabie M. A Finite Element Study of the Bending Behavior of Beams Resting on Two-Parameter Elastic Foundation. *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Tomul LII (LVI), Fasc. 3–4*, 2006, pp. 7-20.

Стаття рекомендована до публікації, д.т.н., проф. О. О'Петренко (Україна); ол. інж. служби колії Придніпровської залізниці СОВОІванчаком (Україна)

Надійшла до редколегії 24.09.2015

Прийнята до друку 12.11.2015