

УДК 625.143.5

М. П. НАСТЕЧИК¹, І. О. БОНДАРЕНКО², Р. В. МАРКУЛЬ^{3*}

¹Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта nastechik_mp@mail.ru, ORCID 0000-0002-4178-6092

²Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта igina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{3*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта guaranga_mr@mail.ru, ORCID 0000-0002-7630-8963

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ЕЛЕМЕНТАХ ВУЗЛА СКРІПЛЕННЯ ТИПУ КПП-5 ПІД ДІЄЮ РУХОМОГО СКЛАДУ

Мета. На сьогодні існує тенденція з впровадження швидкісного та високошвидкісного руху поїздів на дорогах Укрзалізниці, що потребує підвищення міцності та стійкості конструкції залізничної колії. Одночасно із цим підвищились та розширилися вимоги, пред'явлені до проміжних рейкових скріплень. Саме на колійні роботи з утримання та ремонту вузла скріплення припадає від 10 до 18 % трудових витрат під час експлуатації. Одним із основних видів скріплення, які після довготривалих експлуатаційних спостережень увійшли в постійну експлуатацію (5 тис. км) є проміжне скріплення типу КПП-5. Дані попередніх теоретичних досліджень достовірно не давали чітких науково-обґрунтованих відповідей та результатів роботи всього вузла скріплення. Тому метою досліджу є розробка та обґрунтування методики проведення теоретичного дослідження роботи вузла скріплення типу КПП-5 із детальною оцінкою місць появи напруженого стану в його елементах від дії рухомого складу. **Методика.** В основі обґрунтування методики теоретичного дослідження роботи вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 (з детальною оцінкою напруженого стану в його проміжних елементах від дії рухомого складу) лежить теорія методу скінченних елементів (МСЕ). **Результати.** З допомогою застосування теорії МСЕ було встановлено: одним із головних елементів вузла скріплення, які першими сприймають частку величини бічної сили, що передається від дії рухомого складу, є пружні клеми типу КП-5. Аналізуючи отримані дані, встановлено, що значення напружень у прутках клеми з внутрішньої сторони рейкової нитки на 53,1–56 % більше, ніж значення напружень у зовнішній стороні рейкової нитки. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель роботи залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 під дією рухомого складу для дослідження напруженого стану в елементах вузла скріплення. Дана математична модель дозволяє врахувати фізико-механічні властивості досліджуваних елементів та геометричні умови закріплення, що представляють собою конструктивні та експлуатаційні характеристики роботи всього вузла скріплення в цілому. **Практична значимість.** Отримані в даній роботі положення та результати скінченно-елементного моделювання дозволяють відобразити та дослідити найбільш імовірні місця появи напруженого стану в елементах скріплення типу КПП-5, в яких в подальшому можуть виникнути пошкодження та дефекти, що впливатиме на стабільність роботи залізничної колії в цілому.

Ключові слова: проміжне скріплення; пружна клема; підрейкова прокладка; жорсткість; сила притискання; метод кінцевих елементів

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Вступ

Більше ніж півтора століття практика експлуатації колії наочно показала, що для всіх видів дерев'яних і залізобетонних підрейкових основ найбільш складним конструктивно і технологічно найважливішим вузлом є проміжні рейкові скріплення. Саме на колійні роботи з утримання і ремонту скріплень припадає значна частина трудових затрат під час експлуатації колії. Із використанням залізобетонних шпал, одночасно підвищилась і жорсткість залізничної колії, тим самим збільшуючи імовірність появи різних дефектів та пошкоджень в рейках, а також і вібраційної взаємодії між елементами верхньої будови колії. Незадовільний вплив вищезазначених факторів певною мірою проявляється опором конструкції колії збільшеному поїзному навантаженню в поперечно-горизонтальній площині. Особливо це спостерігається в кривих малого радіуса, де величина дії бічних сил коливається від 75 до 130 кН [12]. Результатом дії таких сил є поява у певних місцях елементів скріплення значного напружено-деформованого стану, що впливає на стабільність роботи елементів вузла проміжного рейкового скріплення типу та КПП-5, які на сьогодні є основними по всій мережі Укрзалізниці.

Найбільш достовірні місця напружено-деформованого стану в елементах вузла проміжного рейкового скріплення, в яких в подальшому під час тривалої експлуатації можуть виникнути пошкодження переважно від дії бічних сил, визначались в основному експериментальними методами, що виконувались у 60–70-х роках минулого століття.

Дані досліджень достовірно не давали науково обґрунтованих відповідей та чітких результатів роботи всього вузла проміжного рейкового скріплення під дією сил, що передавались на елементи проміжного рейкового скріплення від рухомого складу.

Мета

Метою є розробка та обґрунтування методики виконання теоретичного дослідження роботи вузла скріплення типу КПП-5 з детальною оцінкою місць появи напруженого стану в його елементах під дією рухомого складу.

Методика

Основою теоретичного дослідження роботи залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 з детальною оцінкою напруженого стану в його проміжних елементах під дією рухомого складу є методика, що базується на теорії методу скінченних елементів (далі МСЕ).

Розв'язання певної задачі включає декілька етапів, що зображено на рис. 1.

На рис. 2 наведена остаточна схема моделі для дослідження та детальної оцінки роботи всього вузла рейкового скріплення типу КПП-5 з метою отримання достовірних результатів НДС елементів внаслідок зовнішньої дії сил, що передаються від коліс рухомого складу.

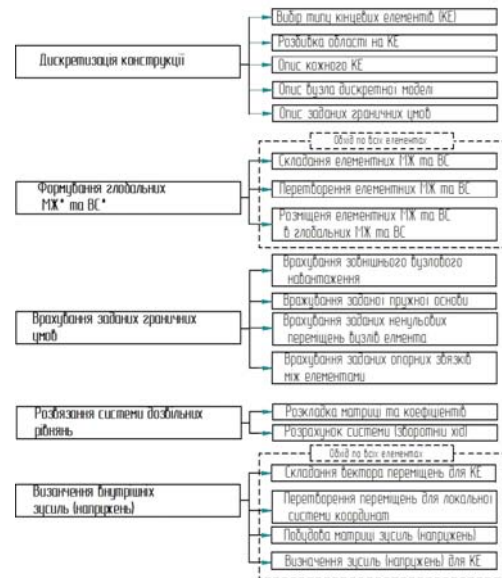


Рис. 1. Основні етапи розрахунку МСЕ та послідовність їх виконання

Fig. 1. The main stages of FEM calculation and consistency of their performance

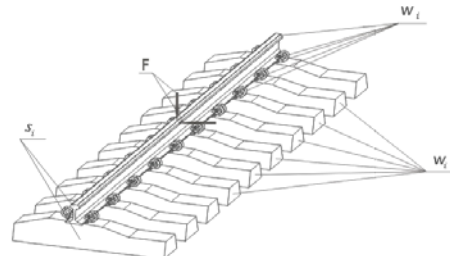


Рис. 2. Модель конструкції залізничної колії із скріпленням типу КПП-5

Fig. 2. Model of railway track construction of a fastening type КПП -5

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Враховуючи велике розсіювання характеристик залізничної колії та екіпажів, точність вимірювання вказаних величин (див. рис. 1) під час виконання експериментів знаходиться з допустимою похибкою на рівні $E = 10\%$. Міра змін цієї величини встановлюється коефіцієнтом варіації « v ». При $E = 10\% \rightarrow v = 10\%$. Тому під час виконання дискретизації конструкції, кількість кроків (рівнів) розбивки області на СЕ в подальших розрахунках визначалось не більше ніж 5% .

На основі попередньо виконаних досліджень було створено такий алгоритм:

$$R = f_{MCE}(\Omega, F, P, n/\Delta = 5\%), \quad (1)$$

$$\text{де } \Omega = \{\{\omega_1, \omega_2, \omega_i \dots\}, \{S_1, S_2, S_i \dots\}\}, \quad (2)$$

$$\omega_i = \{\{g_{i1}, g_{i2}, g_{ij} \dots\}, \{\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \varphi_{ij} \dots\}\}, \quad (3)$$

звідси

$$R = \{\{\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \sigma_{ik} \dots \sigma_{ia} \dots\}, \{y_{i1}, y_{i2}, y_{ia} \dots y_{ia} \dots\}\}, \quad (4)$$

де Ω – збірка елементів колії; ω_i – твердотілий i -ий елемент (об'єкт) сукупності елементів колії (клема, прокладка, рейка та ін.); g_{ij} , φ_{ij} – j -ий елемент сукупності геометричних параметрів і множина фізико-механічних властивостей об'єкта ω_i відповідно; $S = \{S_1, S_2, S_i \dots\}$ – множина (сукупність) зв'язків між об'єктами; F, P – сукупність навантажень та закріплень; n – кількість циклів розрахунку; Δ – %-на схожість суміжних результатів; σ_a , y_a – k -ий елемент напружень та деформацій об'єкта ω_i ; R – стан моделі відповідно розрахункам МКЕ.

Напруження, що пов'язані із деформаціями, описуються співвідношенням:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\}, \quad (5)$$

де $\{\sigma\}$ – вектор напружень; $[D]$ – матриця жорсткості; $\{\varepsilon^{el}\}$ – вектор пружної деформації.

Вектор напружень визначається з виразу:

$$\{\sigma\} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}]^T. \quad (6)$$

Вихідний масив, виражений вектором пружної деформації, описується виразом:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D^{-1}] \{\sigma\}, \quad (7)$$

де $\{\varepsilon\}$ – вектор повної деформації; $\{\varepsilon^{th}\}$ – вектор температурної деформації.

Звідси

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}\}. \quad (8)$$

Вектор температурної деформації визначається з виразу:

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, 0, 0, 0]^T, \quad (9)$$

$$\Delta T = T - T_{REF}$$

де $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ – коефіцієнт температурного розширення елемента в напрямку площини x, y, z ; T – існуюча температура в певній точці; T_{REF} – температура, при якій деформації відсутні.

Вектори деформацій (ε) в певних точках x, y, z, xy, yz, xz описуються такими рівняннями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \Delta_x \Delta T + \sigma_x / E_x - \nu_{xy} \sigma_y / E_y - \nu_{xz} \sigma_z / E_z \\ \varepsilon_y &= \Delta_y \Delta T + \sigma_y / E_y - \nu_{xy} \sigma_x / E_x - \nu_{yz} \sigma_z / E_z \\ \varepsilon_z &= \Delta_z \Delta T + \sigma_z / E_z - \nu_{xz} \sigma_x / E_x - \nu_{yz} \sigma_y / E_y, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}}; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}}; \quad \varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}}$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – величини деформацій елемента в напрямку осей x, y, z ; $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}$ – деформації зсуву КЕ-точок в площинах xy, xz, yz ; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – напруження в елементах по осях x, y, z ; $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$ – напруження зсуву в площинах xy, xz, yz .

Згідно з виразом (5), обернена матриця описується так:

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$[D^{-1}] = \begin{pmatrix} 1/E_x & -v_{yx}/E_y & -v_{zx}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -v_{yx}/E_x & 1/E_y & -v_{zy}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -v_{zx}/E_z & -v_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_y & 1/G_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

де E – модуль Юнга по осях x, y, z ; v – коефіцієнт Пуансона; G – модуль зсуву в площинах xy, xz, yz .

Напруження (σ), що виникають в елементах в напрямку осей x, y, z , та напруження зсуву в площинах xy, xz, yz , описуються за такими виразами:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E_x / h \left[1 - (v_{yx}^2) E_y / E_z \right] (\varepsilon_x - \Delta_x \Delta T) + \\ &+ E_x / h \left[v_{yx} + v_{zx} v_{yz} E_y / E_z \right] \times \\ &\times (\varepsilon_y - \Delta_y \Delta T) + E_x / h \left[v_{zx} + v_{yz} v_{zx} \right] \times \\ &\times (\varepsilon_z - \Delta_z \Delta T) \\ \sigma_y &= E_y / h \left[1 - (v_{zx}^2) E_x / E_z \right] (\varepsilon_y - \Delta_y \Delta T) + \\ &+ E_x / h \left[v_{yx} + v_{zx} v_{yz} E_y / E_z \right] \times \\ &\times (\varepsilon_x - \Delta_x \Delta T) + E_y / h \left[v_{yx} + v_{xz} v_{yx} E_x / E_z \right] \times \\ &\times (\varepsilon_z - \Delta_z \Delta T) \\ \sigma_z &= E_z / h \left[1 - (v_{yx}^2) E_x / E_z \right] (\varepsilon_z - \Delta_z \Delta T) + \\ &+ E_x / h \left[v_{zx} + v_{zy} v_{yx} \right] \times \\ &\times (\varepsilon_x - \Delta_x \Delta T) + E_y / h \left[v_{yz} + v_{xz} v_{yx} E_x / E_z \right] \times \\ &\times (\varepsilon_y - \Delta_y \Delta T) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \varepsilon_{xy}, \quad \sigma_{zy} = G_{zy} \varepsilon_{zy}, \quad \sigma_{zx} = G_{zx} \varepsilon_{zx}$$

$$\begin{aligned} \text{де } h &= 1 - (v_{xy}^2) E_x / E_y - (v_{zy}^2) E_y / E_z - \\ &- (v_{xz}^2) E_x / E_z - 2v_{xy} v_{zy} v_{xz} E_x / E_z. \end{aligned} \quad (13)$$

Модуль зсуву в площинах xy, xz, yz описується такими виразами:

$$G_{xy} = (E_x E_y) / (E_x + E_y + 2v_{yx} E_x), \quad (14)$$

$$G_{zy} = (E_y E_z) / (E_y + E_z + 2v_{yz} E_y), \quad (15)$$

$$G_{xz} = (E_x E_z) / (E_x + E_z + 2v_{zx} E_x). \quad (16)$$

Під час дослідження напруженого стану елементів у вузлі проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 до моделі прикладались зовнішні сили (F) (див. рис. 2), які виникають у складних умовах експлуатації, а саме: в кривих ділянках колії.

На основі цього було детально переглянуто та проаналізовано значення бічних та горизонтальних сил, що виникають в кривих ділянках колії під дією рухомого складу, за експериментальними звітами лабораторії КГНДЛ ДНУЗТу [2–5, 7, 15–16]. У ході аналізу брались до уваги різні види дослідного рухомого складу та параметри улаштування ділянок колії.

Оцінка зміни величини бічних та вертикальних сил, що виникають в колії під дією різних типів рухомого складу залежно від діапазону радіусів, зображено на рис. 3–5.

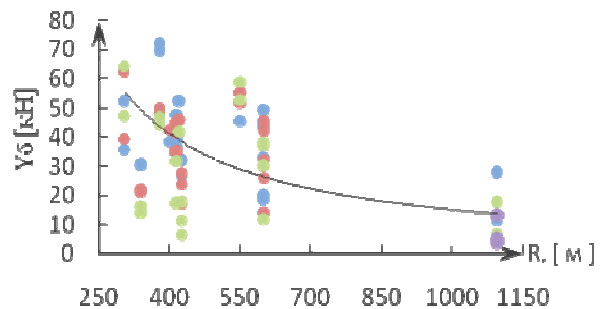


Рис. 3. Залежність бічних сил по зовнішній рейковій нитці від діапазону радіусів

Fig. 3. The dependence of lateral forces in the external rail thread from the range of radiuses

Величина бічних горизонтальних сил залежно від діапазону радіусів носить нелінійний характер (рис. 3), який можна описати функцією:

$$y = a + \frac{b}{x}, \quad (17)$$

де a, b – постійні параметри.

Параметри функції 17, за яких вона має мінімум, можна описати системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \\ \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2, \end{aligned} \quad (18)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

де x_i , y_i – виміряні координати i -ї точки; n – кількість точок з вимірними координатами.

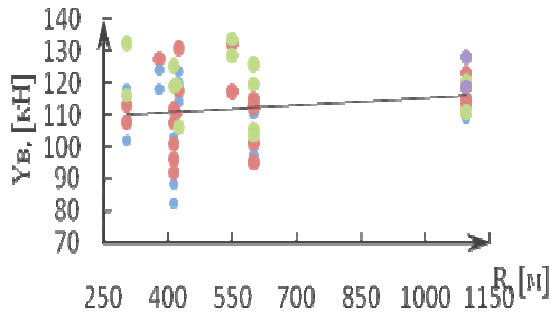


Рис. 4. Значення вертикальних сил по зовнішній нитці кривої залежно від діапазону радіусів

Fig. 4. The value of vertical forces in the external thread of the curve from range of radiuses

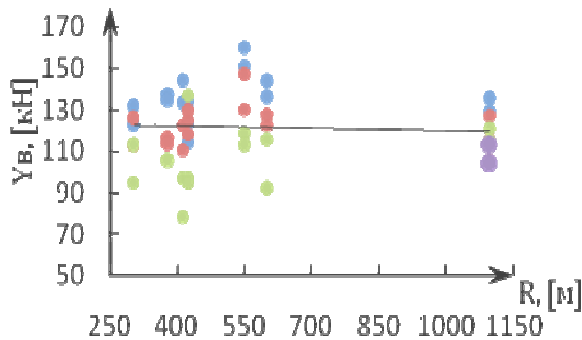


Рис. 5. Значення вертикальних сил по внутрішній нитці кривої залежно від діапазону радіусів

Fig. 5. The value of vertical forces on the internal thread of the curve from range of radiuses

Характер зміни величини вертикальних сил як по внутрішній, так і по зовнішній рейковій нитках залежно від діапазону радіусів R , м (за результатами апроксимування) носить лінійний характер (рис. 4, 5) та може описуватись функцією:

$$y = ax + b. \quad (19)$$

Параметри функції (19) за методом найменших квадратів [11] можна описати такою системою рівнянь:

$$\begin{aligned} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb &= \sum_{i=1}^n y_i. \end{aligned} \quad (20)$$

За результатами апроксимування на рис. 3–5 можна побачити, що:

- величина бічних сил в кривих ділянках колії радіусом $R = \infty$ до $R = 600$ м стрімко збільшується і становить 60,5 %, в діапазонах кривих від 501–600 м до 401–500 м – на 8,33 %, від 401–500 м до 300–400 м – на 20 %;

- по зовнішній рейковій нитці величина вертикальних сил змінюється в діапазонах радіусів від 601–1000 м до 501–600 м на 0,16 %, від 501–600 м до 401–500 м – на 0,19 %, від 401–500 м до 300–400 м – на 1,2 %;

- по внутрішній рейковій нитці величина вертикальних сил змінюється в діапазонах радіусів від 601–1000 м до 501–600 м – на 1,68 %, від 501–600 м до 401–500 м – на 0,24 %, від 401–500 м до 300–400 м – на 6,6 %.

Результати розрахунків при різних середніх значеннях бічних та вертикальних сил, що виникають в діапазонах радіусів $R=300 \div 420$ м; $421 \div 550$ м; $551 \div 600$ м, зображені у табл. 1.

Під час дослідження напруженого стану елементів у вузлі проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 до моделі прикладалась система сил (рис. 6), яка виникає у складних умовах експлуатації, а саме: в кривих ділянках колії при різних діапазонах радіусів.

Таблиця 1

Розрахункові значення напружень (σ , МПа) в клемах

Table 1

The calculated stress values (σ , MPa) in the terminals

Діапазон радіусів R, м	Значення напружень (МПа) в клемах			
	Клема № 1		Клема № 2	
	Нижня частина прутка	Верхня частина прутка	Нижня частина прутка	Верхня частина прутка
300...420	134,945	29,956	57,716	24,512
421...550	98,923	26,991	38,484	20,312
551...600	72,885	23,918	36,712	17,480

Зміна величини напружень, що виникають в прутках клеми при різних значеннях сили, зображено відповідно на рис. 7.

Проаналізувавши теоретично-отримані дані, що зображені на рис. 7, та згідно з табл. 1 встановлено, що середні значення напружень, які

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

виникають в прутках клеми № 1 (внутрішня сторона рейкової нитки), значно більші, ніж величини напружень в прутках клеми № 2 (зовнішня сторона рейкової нитки). Процентне співвідношення яких зображено на рис. 8.

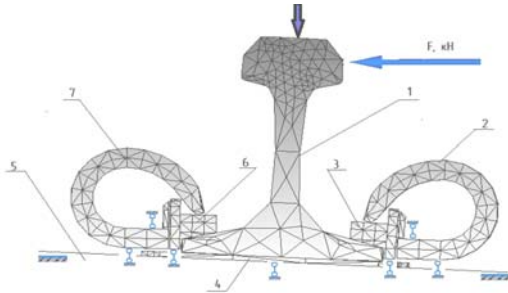


Рис. 6. Розрахункова схема вузла рейкового скріплення типу КПП-5:

1 – рейка; 2, 7 – клеми; 4 – підрейкова прокладка;
5 – залізобетонна шпала; 3, 6 – ізолюючий вкладиш

Fig. 6. Calculation model of node rail fastening, type КПП-5:

1 – rail; 2, 7 – terminals; 4 – rail pad;
5 – concrete ties; 3, 6 – isolating liner

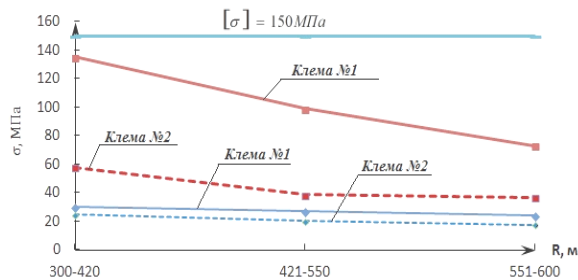


Рис. 7. Залежність напружень у прутках клем по зовнішній та внутрішній стороні рейкової нитки

Fig. 7. The dependence of the stresses in the bars of terminals on the external and internal sides of the rail thread

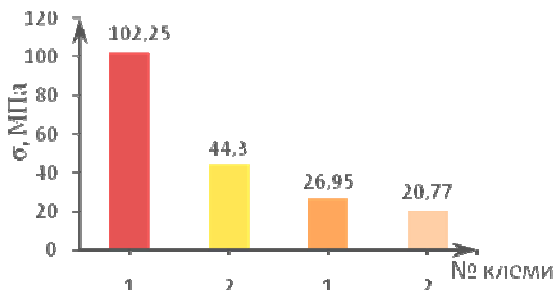


Рис. 8. Порівняльні середні значення напружень в прутках клем 1 та 2

Fig. 8. Comparative average values of stresses in the bars with terminals 1 and terminal 2

Згідно з рис. 8 проаналізувавши отримані дані, встановлено, що значення напружень у нижній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки на 56 % більші, ніж по зовнішній стороні рейкової нитки. Значення напружень у верхній частині прутка клеми на 53,1 % більші, ніж значення напружень у верхній частині прутка клеми, але не перевищують допустимих, що підтверджено також [1, 9, 14].

Результати

В результаті аналізу отриманих даних, що зображені на рис. 8, бачимо, що значення напружень у прутках клеми по внутрішній стороні рейкової нитки на 53,1–56 % більші, ніж значення напружень по зовнішній стороні рейкової нитки.

Отримавши на основі теоретичних розрахунків, згідно з вищенаведеним алгоритмом, вихідні значення напружених властивостей k -ого елемента конструкції, можливо проаналізувати найбільш імовірно-достовірні місця появи максимальних напружень в елементах вузла проміжного рейкового кріплення типу КПП-5, особливо в клеми.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблена математична модель роботи залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 під дією рухомого складу для дослідження напруженого стану у елементах вузла скріплення. Ця математична модель дозволяє врахувати фізико-механічні властивості дослідних елементів та геометричні умови закріплення, що являють собою конструктивні та експлуатаційні характеристики роботи всього вузла скріплення в цілому.

Отримані в роботі положення та результати СЕ-моделювання дозволяють відобразити та дослідити найбільш імовірні місця появи напруженого стану в елементах скріплення типу КПП-5, в яких в подальшому можуть виникнути пошкодження та дефекти, що вплине на стабільність роботи залізничної колії в цілому.

Висновки

За допомогою моделювання роботи конструкції залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5, що ґрунтується

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

на теорії МСЕ, було встановлено, що одним із головних елементів вузла скріплення, які першими сприймають частку величини бічної сили, що передається під дією рухомого складу, є пружні клеми типу КП-5.

У місцях клеми, де напружений стан, що виникає від сумісної взаємодії колії та коліс рухомого складу, є максимальним, під час експлуатації будуть виникати напруження втоми [10], які в подальшому можуть призвести до послаблення силового ланцюжка – «рейка-клема-прокладка». Одночасно це призведе до втрати стабільності роботи вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 та можливо-го виникнення угону плітей безстиків колії [8, 10, 17–18,].

На сьогодні особливість утримання скріплення типу КПП-5 полягає у заміні дефектних деталей в ході їх виявлення. Елементи скріплення ремонту не підлягають і замінюються на нові, які визначаються натурним оглядом геометричних розмірів [6].

На цей час існує проблема, що пов'язана з відсутністю методики та засобів контролю за станом роботою вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 в експлуатації, а саме: контроль за роботою клем типу КП-5, оскільки вони визначають надійність роботи вузла скріплення в цілому. Виникає необхідність розробки рекомендацій щодо утримання залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5, які б дозволили підсилити роботу вузла скріплення з одночасним збереженням необхідної величини сили притискання рейки до підрейкової основи протягом всього міжремонтного терміну експлуатації.

Це одночасно відкрило б можливість збільшення полігону укладки проміжних рейкових скріплень типу КПП-5, включаючи і криві радіусом менше ніж 400 м.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Говоруха, В. В. Создание и внедрение упругих элементов промежуточного скрепления рельсового пути / В. В. Говоруха // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 162–171.
2. Експериментальне дослідження впливу на колію та стрілочні переводи дослідних піввагонів на візках моделі 18-4129 з навантаженням на

вісь 25 тс у порівнянні з піввагоном на візках моделі 18-100 з навантаженням на вісь 23,5 тс. : звіт про НДР / ДНУЗТ ; кер. Рыбкин В. В. ; викон.: Гнатенко В. П., Циганенко В. В., Мойсеєнко К. В. – Дніпропетровськ, 2008. – 56 с. – Бібліогр.: с. 56. – № ГР 0107U010381.

3. Испытания электровоза ЭПЛ-01 по критерию воздействия на путь и стрелочные переводы : отчет о НИР / ДНУЖТ ; рук. Рыбкин В. В. ; исполн.: Гнатенко В. П., Татуревич А. П. – Днепропетровск, 2002. – 63 с. – Библиогр.: с. 63. – № ГР 0102U005873.
4. Испытания электровоза ЭПЛ9Т-001 по критерию воздействия на путь и стрелочные переводы : отчет о НИР / ДНУЖТ ; рук. Рыбкин В. В. ; исполн.: Гнатенко В. П., Татуревич А. П. – Днепропетровск, 2002. – 158 с. – Библиогр.: с. 158. – № ГР 0102U005875.
5. Испытания электропоезда ЭПЛ2Т-01 по критерию воздействия на путь и стрелочные переводы : отчет о НИР / ДНУЖТ ; рук. Рыбкин В. В. ; исполн.: Гнатенко В. П., Татуревич А. П. – Днепропетровск, 2006. – 114 с. – Библиогр.: с. 114. – № ГР 0102U005873.
6. Інструкція з укладання та утримання рейкової колії з рейками типу Р65, УІС60 і пружним проміжним скріпленням типу КПП-5 та високіми ізолюючими стиками (ЦП-0104) / С. М. Демченко, В. Л. Піскунов, О. В. Саєнко, В. О. Сестринський. – Київ : Транспорт України, 2003. – 46 с.
7. Комплексные ходовые динамические и прочностные и по воздействию на путь, стендовые статистические на действие продольной силы, ударно-определятельные испытания электровоза ДС3-001 : отчет о НИР / ДНУЖТ ; рук. Блохин Е. П., Рыбкин В. В. ; исполн.: Блохин Е. П., Рыбкин В. В. – Днепропетровск, 2004. – 196 с. – Библиогр.: с. 196. – № ГР 0103U003009.
8. Нехорошев, Ю. П. Результаты испытаний скрепления СБ-3 / Ю. П. Нехорошев, В. И. Матвеев // Путь и путевое хоз-во. – 2005. – № 6. – С. 26–27.
9. Оцінка параметрів пружної клеми марки КП-5.2 / М. Д. Костюк., В. В. Рыбкин., І. О. Бондаренко., Н. М. Івченко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 11–17.
10. Рыбкин, В. В. Исследование вопросов внедрения конструкции бесстыкового пути на железобетонных шпалах в кривых радиусом менее 300 м / В. В. Рыбкин, Н. П. Настечик, Р. В. Маркуль // Современ. проблемы проектиро-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- вания, стр-ва и эксплуатации ж.-д. пути : тр. X науч.-техн. конф. – Москва, 2013. – С. 198–201.
11. Рибкін, В. В. Надійність залізничної колії : навч. посіб. / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2013. – 154 с.
 12. Рибкін, В. В. Оцінка впливу величини бічної-горизонтальної сили, що передається на вузол проміжного рейкового скріплення типу КБ та КПП-5 / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль / Пробл. взаємодії колії та рухомого складу : пр. міжнарод. наук.-практ. конф., присвяченій 100-річчю проф. М. А. Фрішмана / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 38–39.
 13. Рибкін, В. В. Оцінка втомлено-міцністних характеристик елементів вузла проміжного рейкового скріплення типу КБ-65 та КПП-5 при повторно-змінних циклах навантаження конструкції / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль / Пробл. взаємодії колії та рухомого складу : пр. міжнарод. наук.-практ. конф., присвяченій 100-річчю проф. М. А. Фрішмана / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 39–40.
 14. Уманов, М. И. Исследования напряженно-деформированного состояния пути со скреплением КПП / М. И. Уманов, В. В. Ковалев, С. Н. Сова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 101–105.
 15. Умови дослідного зразка маневрового тепловоза ТЕМ103, розроблені на підставі результатів експериментальних та теоретичних досліджень його впливу на колію та стрілочні переводи : звіт про НДР / ДНУЗТ ; кер. Рибкін В. В. ; викон.: Гнатенко В. П., Циганенко В. В. – Дніпропетровськ, 2007. – 44 с. – Бібліогр.: с. 44. – № ГР 0107U005238.
 16. Условия обращения опытного образца магистрального пассажирского тепловоза ТЕП150-001, разработанные на основании экспериментальных исследований его воздействия на путь и стрелочные переводы : отчет о НИР / ДНУЖТ ; рук. Рыбкин В. В. ; исполн.: Гнатенко В. П., Татуревич А. П. – Дніпропетровськ, 2006. – 102 с. – Библиогр.: с. 102. – № ГР 0106U010227.
 17. Rezaie, F. Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre – stressed concrete sleepers / F. Rezaie, M. R. Shiri, S. M. Farman // Engineering Failure Analysis. – 2012. – Vol. 26. – P. 21–30. doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.001
 18. Rybkin, V. V. Stability issues of the continuous welded rail track on the concrete sleepers on the curves with radius $R \leq 300$ m / V. V. Rybkin, N. P. Nastechik, R.V. Marcul // Sciences in Cold and Arid Region. – Beijing, 2013. – Vol. 5. – Iss. 5. – P. 1–7.

М. П. НАСТЕЧИК¹, И. А. БОНДАРЕНКО², Р. В. МАРКУЛЬ^{3*}

¹Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта nastechik_mr@mail.ru, ORCID 0000-0002-4178-6092

²Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{3*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта guaranga_mr@mail.ru, ORCID 0000-0002-7630-8963

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ УЗЛА СКРЕПЛЕНИЯ ТИПА КПП-5 ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Цель. На сегодняшний день существует тенденция по внедрению скоростного и высокоскоростного движения поездов на дорогах Укрзалізницы, что требует повышения прочности и устойчивости конструкции железнодорожного пути. Одновременно с этим повысились и расширились требования, предъявляемые к промежуточным рельсовым скреплениям. Именно на путевые работы по содержанию и ремонту узла скрепления приходится от 10 до 18 % трудовых затрат во время эксплуатации. Одним из основных видов скрепления, которые после длительных эксплуатационных наблюдений вошли в постоянную эксплуатацию (5 тыс. км), является промежуточное скрепление типа КПП-5. Данные предыдущих теоретических исследо-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ваний достовірно не давали чітких науково обґрунтованих відповідей і результатів роботи всього вузла кріплення. Тому метою дослідження є розробка і обґрунтування методики проведення теоретичного дослідження роботи вузла кріплення типу КПП-5 з детальною оцінкою місць появи напруженого стану в його елементах від впливу рухомого складу. **Методика.** В основі обґрунтування методики теоретичного дослідження роботи вузла проміжного рельсового кріплення типу КПП-5 (з детальною оцінкою напруженого стану в його проміжних елементах від впливу рухомого складу) лежить теорія методу кінцевих елементів (МКЕ). **Результати.** Застосування теорії МКЕ було встановлено: одним з головних елементів вузла кріплення, які першими відчувають частину величини бокової сили, передаваної від впливу рухомого складу, є пружні клемми типу КП-5. Аналізуючи отримані дані, встановлено, що значення напружень в прутках клемми з внутрішньої сторони рельсової нити на 53,1–56 % більше, ніж значення напружень на зовнішній стороні рельсової нити. **Наукова новизна.** Розроблено математичну модель роботи залізничного шляху з проміжним рельсовим кріпленням типу КПП-5 під впливом рухомого складу для дослідження напруженого стану в елементах вузла кріплення. Дана математична модель дозволяє врахувати фізико-механічні властивості досліджуваних елементів і геометричні умови кріплення, які представляють собою конструктивні та експлуатаційні характеристики роботи всього вузла кріплення в цілому. **Практична значимість.** Отримані в даній роботі висновки і результати КЕ-моделювання дозволяють відобразити і дослідити найбільш ймовірні місця появи напруженого стану в елементах кріплення типу КПП-5, в яких в подальшому можуть виникнути пошкодження і дефекти, що впливають на стабільність роботи залізничного шляху в цілому.

Ключові слова: проміжне кріплення; пружна клемма; подрельсова прокладка; жорсткість; сила прикриття; метод кінцевих елементів

N. P. NASTECHIK¹, I. A. BONDARENKO², R. V. MARCUL^{3*}

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 31, e-mail nastechik_mp@mail.ru, ORCID 0000-0002-4178-6092

²Dept. «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 31, e-mail irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{3*}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 31, e-mail guaranga_mr@mail.ru, ORCID 0000-0002-7630-8963

INVESTIGATION OF STRESS STATE IN THE ELEMENTS OF RAIL FASTENINGS, TYPE КПП-5 UNDER THE INFLUENCE OF ROLLING STOCK

Purpose. To date, there is a tendency for the implementation of high-speed trains on the territory of the Ukrainian Railways, which requires increasing the strength and stability of the construction of the railway track. At the same time requirements for intermediate rail fastening have increased and widened. It is on trackwork and repair of the rail fastening labor costs during the operation are from 10 to 18%. One of the main types of fastening, which after long operational observations was included in the permanent operation (5 th. km.) is an intermediate fastening, type КПП-5. Data from previous theoretical studies reliably prevented clear science-based answers and results of the rail fastening. Therefore, the aim is to develop a methodology and rationale for the theoretical research work of rail fastening, type КПП-5 with a detailed assessment of the appearance of stress state places in its elements from the effects of rolling stock. **Methodology.** The basis of study methods of theoretical research work of the intermediate rail fastening, type КПП-5 (with a detailed assessment of the state of stress in its intermediate elements from the effects of the rolling stock) is the theory of finite elements method (FEM). **Findings.** Using the FEM it was found that one of the main elements of the intermediate rail fastening, which first perceives share of the value of the lateral force transmitted from the effects of rolling stock are elastic type terminals, type КП-5. Analyzing the data set, the bars in the terminal voltages at the inner side of the rail thread 53,1-56% are greater than the stresses on the outside of rail thread. **Originality.** A mathematical model of railway track with intermediate rail fastening, type КПП-5 under the action of rolling stock for the study of the stress state in the elements of fastening was developed. This mathematical model let take into account the physical and mechanical properties of the test elements and geometri-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

cal fixing fastenings as constructive and operational characteristics of the entire rail fastening in general. **Practical value.** The obtained results in this work of FE simulations allow reflecting and exploring the most likely places of the stress state appearance in the elements of the fastening, type КПП-5, in which damages and defects can be in the future. This in general will affect the operation stability of the railway track as a whole.

Keywords: intermediate fastening; elastic terminal; under-rail pad; stiffness; pressing force; finite element method

REFERENCES

1. Govorukha V.V. Sozdaniye i vnedreniye uprugikh elementov promezhutochnogo skrepleniya relsovogo puti [The creation and implementation of elastic elements of intermediate rail fastening]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, issue 2, pp. 162-171.
2. Rybkin V.V., Gnatenko V.P., Tsyhanenko V.V., Moiseienko K.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu na koliu ta strilochni perevody doslidnykh pivvahoniv na vizkakh modeli 18-4129 z navantazhenniam na vis 25 ts u porivnianni z pivvahonom na vizkakh modeli 18-100 z navantazhenniam na vis 23,5 t [Experimental study of the effects on the tracks and switches of research gondolas on trucks, model 18-4129 with an axle load of 25 t compared to the gondola on the model 18-100 trucks with axle load of 23.5 t.]. Dnipropetrovsk, 2008. 56 p. No. GR 0107U005238.
3. Rybkin V.V., Gnatenko V.P., Taturevich A.P. *Ispytaniya elektrovoza ЭПЛ-01 po kriteriyu vozdeystviya na put i strelochnyye perevody* [Test of ЭПЛ-01 locomotive by criterion effects on the tracks and switches]. Dnipropetrovsk, 2002. 63 p. No. GR 0102U005873.
4. Rybkin V.V., Gnatenko V.P., Taturevich A.P. *Ispytaniya elektrovoza ЭПЛ9Т-001 po kriteriyu vozdeystviya na put i strelochnyye perevody* [Test of ЭПЛ9Т-001 locomotive by criterion effects on the tracks and switches]. Dnipropetrovsk, 2002. 158 p. No. GR 0102U005875.
5. Rybkin V.V., Gnatenko V.P., Taturevich A.P. *Ispytaniya elektropoyezda ЭПЛ2Т-01 po kriteriyu vozdeystviya na put i strelochnyye perevody* [Test of ЭПЛ2Т-01 locomotive by criterion effects on the tracks and switches]. Dnipropetrovsk, 2006. 114 p. No. GR 0102U005873.
6. Demchenko S.M., Piskunov V.L., Saienko O.V., Sestrynskyi V.O. Instruktssiia z ukladannia ta utrymannia reikovoii kolii z reikamy typu P65, UIC60 i pruzhnym promizhnym skriplenniam typu КПП-5 ta vysokomitsnymy izoliuiuchymy stykamy (ЦП-0104) [Instructions for the laying and maintenance of track rails, type P65, UIC60 and elastic intermediate fastening, type КПП-5 and high strength and insulating joints (ЦП-0104)]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2003. 46 p.
7. Blokhin Ye.P., Rybkin V.V. Kompleksnyye khodovyie i dinamicheskiye i prochnostnyye po vozdeystviyu na put, stendovyie statisticheskiye na deystviye prodolnoy sily, udarno-opredelitelnyye ispytaniya elektrovoza ДС3-001 [Complex leading and dynamic and strength upon influence the track, bench statistics for the longitudinal force, the shock-determinative tests of locomotive ДС3-001]. Dnipropetrovsk, 2004. 196 p. No. GR 0103U003009.
8. Nekhoroshev Yu.P., Matvetsov V.I. Rezultaty ispytaniy skrepleniya СБ-3 [The test results of СБ-3 fastening]. *Put i putevoye khozyaystvo – The Track and Track Facilities*, 2005, no. 6, pp. 26-27.
9. Kostyuk M.D., Rybkin V.V., Bondarenko I.O., Ivchenko N.M. Otsinka parametrov pruzhnoi klemy marky КП.-5.2 [Assessment of elastic parameters of the brand КП.-5.2.]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, issue 2, pp. 11-17.
10. Rybkin V.V., Nastechik N.P., Markul R.V. Issledovaniye voprosov vnedreniya konstruktssii besstykovogo puti na zhelezobetonnykh shpalakh v krivykh radiusom menyey 300 m [Research of the introduction questions of the continuous welded rail design on concrete sleepers in curves with a radius less than 300 m]. *Trudy X nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennyye problemy proyektirovaniya, stroitelstvava i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»* [Proc. of the X Sci.-Technical Conf. «Contemporary issues of design, construction and operation of railways»]. Moscow, 2013, pp. 198-201.
11. Rybkin V.V., Bondarenko I.O., Kurhan D.M. *Nadiinist zaliznychnoi kolii* [The reliability of a railway track]. Dnipropetrovsk, DNUZT Publ., 2013. 154 p.
12. Rybkin V.V., Bondarenko I.O., Markul R.V. Otsinka vplyvu velychyny bichnoi-horyzontalnoi syly, shcho peredaetsia na vuzol promizhnoho reikovooho skriplennia typu КБ та КПП-5 [Evaluation of the effect of the magnitude of the lateral and horizontal forces transmitted to the node intermediate rail fastening, type КБ and

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- КПП-5]. *Pratsi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy vzaємодії kolii ta rukhomoho skladu»* [Proc. of Intern. Sci. and Practical Conf. «Problems of Interaction between the Track and Rolling Stock»]. Dnipropetrovsk, 2013, pp. 38-39.
13. Rybkin V.V., Bondarenko I.O., Markul R.V. Otsinka vtomleno-mitsnistnykh kharakterystyk elementiv vuzla promizhnoho reikovooho skriplennia typu КБ-65 ta КПП-5 pry povtorno-zminnykh tsyklakh navantazhennia konstrukttsii [Evaluation of wearily and strength characteristics of the elements of the intermediate rail fastening, type КБ-65 and КПП-5 during revariable load cycles design]. *Pratsi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy vzaємодії kolii ta rukhomoho skladu»* [Proc. of Intern. Sci. and Practical Conf. «Problems of Interaction between the Track and Rolling Stock»]. Dnipropetrovsk, 2013, pp. 39-40.
 14. Umanov M.I., Kovalev V.V., Sova S.N. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya puti so skrepleniemy KПП [The study of stress-strain state of the road with a KПП fastening]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, issue 2, pp. 101-105.
 15. Rybkin V.V., Hnatenko V.P., Tsyhanenko V.V. Umovy doslidnoho zrazka manevrovoho teplovoza TEM103, rozrobleni na pidstavi rezultativ eksperymentalnykh ta teoretychnykh doslidzhen yoho vplyvu na koliiu ta strilochni perevody [The conditions of the prototype shunting locomotive TEM 103 developed on the basis of the results of experimental and theoretical studies of its effects on the tracks and switches]. Dnipropetrovsk, 2007. 44 p. No. GR 0107U005238.
 16. Rybkin V.V., Gnatenko V.P., Taturevich A.P. Usloviya obrashcheniya opytnogo obraztsa magistralnogo paszahirskogo teplovoza TEП150-001, rozrabotannyye na osnovanii eksperimentalnykh issledovaniy yego vozdeystviya na put i strelochnyye perevody [The conditions of circulation of the prototype mainline passenger locomotive TEП-001, developed on the basis of experimental studies of its effects on the tracks and switches]. Dnipropetrovsk, 2006. 102 p. No. GR 0106U010227.
 17. Rezaie F., Shiri M.R., Farman S.M. Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre – stressed concrete sleepers. *Engineering Failure Analysis*, 2012, vol. 26, pp. 21-30. doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.001.
 18. Rybkin V.V., Nastechik N. P., Marcul R.V. Stability issues of the continuous welded rail track on the concrete sleepers on the curves with radius $R \leq 300$ m. *Sciences in Cold and Arid Region*, 2013, vol. 5, issue 5, pp. 1-7.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна); д.т.н. проф. Й. Й. Лучком (Україна).

Надійшла до редколегії: 13.02.2015.

Прийнята до друку: 26.03.2015