УДК 625.143 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.112574

ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ ЖОРСТКОСТІ РЕЙКОВИХ ОПОР ПРИ ШПАЛАХ СБ-3-0 І СКРІПЛЕННЯХ КПП-5

Д-р техн. наук О. М. Даренський, канд. техн. наук Д. О. Потапов, інж. С. В. Кулік

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ РЕЛЬСОВЫХ ОПОР ПРИ ШПАЛАХ СБ-3-0 И СКРЕПЛЕНИЯХ КПП-5

Д-р техн. наук А. Н. Даренский, канд. техн. наук Д. А. Потапов, инж. С. В. Кулик

FORMING OF SPATIAL INFLEXIBILITY OF RAIL SUPPORTS AT RAILROAD TIES SB-3-0 AND FASTENING КРР-5

Dr. Tech. Sc. A. N. Darenskiy, Ph.d. (Tech.) D. O. Potapov, eng. S. V. Kulik

При дії на рейку вертикальних і бічних сил відбувається її вигин у вертикальній і горизонтальній площині та її крутіння. Складовими реакцій рейкових опор є вертикальні і горизонтальні реакції рейкових скріплень і реактивні крутні моменти. Тому у даній роботі розглядається вертикальна й горизонтальна поперечні жорсткості скріплення типу КПП-5 при вигинах і його жорсткість при крутінні рейки.

Ключові слова: *просторова жорсткість, математичне моделювання, вузли скріплень, крутні моменти, підрейкова основа.*

При действии на рельс вертикальных и боковых сил происходит его изгиб в вертикальной и горизонтальной плоскости и его кручение. Составляющими реакций рельсовых опор являются вертикальные и горизонтальные реакции рельсовых скреплений и реактивные крутящие моменты. Поэтому в данной работе рассматривается вертикальная и горизонтальная поперечные жесткости скреплений типа КПП-5 при изгибах и его жесткость при кручении рельса.

Ключевые слова: *пространственная жесткость, математическое моделирование, узлы скреплений, крутящие моменты, подрельсовая основа.*

At action on the rail of forces vertical and lateral there is its bend in a plane vertical and horizontal and its twisting. The reactions of the rail fastening and reactive croutni vertical and horizontal are the constituents of reactions of rail supports moments. Therefore in the given work is examined vertical and horizontal transversal inflexibilities of fastening to the type CPP-5-5 at bends and his inflexibility at twisting of rail.

Rozrahovouyochi action of these forces, it is needed to take into account the elements of resistance of subrail gasket to squeezing action.

By means the calculations it was led to, that an equilibrium in the knot of fastening would be when final assembling forces of the terminal pinning will equal resilient resistance of gasket of compression.

But studying action of forces vertical and lateral in fastening, it is impossible not to take into account horizontal transversal inflexibility of fastening, which arises up under action of lateral force, and also inflexibility, at twisting.

As a result of calculations the inflexibilities of knot of fastening to the type CPP-5-5 mathematical to dependence are Got at vertical and horizontal bends and twisting of rail under action of lateral forces as functions of inflexibility of resilient elements of fastening.

Keywords: *spatial inflexibility, mathematical design, knots of clamping, twisting moments, subrail basis.*

Вступ. Скріплення КПП-5 вигідно відрізняється від скріплення типу КБ – найпоширенішого на мережі залізниць, у першу чергу малою кількістю елементів. У скріпленні КПП-5 п'ять елементів (ураховуючи анкери складовою частиною шпали С- 3-0), у скріпленні КБ – 21 елемент.

Відсутність у скріпленні КПП-5 різьбових сполучень повинна істотно підвищити стабільність притиснення рейки до шпал, опірність силам угону.

Виключення з переліку колійних робіт – робіт із закріплення клемних і закладних болтів, істотно (до 10 %) скоротить загальні витрати праці на поточне утримання та ремонти колії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проміжні рейкові скріплення типу КПП-5 дозволено до застосування на залізницях України з 2003 року. Нормативні документи [1-3] дозволяють укладання безстикової колії на ділянках з будь-якою вантажонапруженістю в прямих і кривих з радіусами 350 м і більше. Довжина плітей безстикової колії може досягати довжини блок-ділянок або перегону (наддовгі пліті).

Однак ні в діючих нормативних документах [1-3], ні в опублікованих останнім часом результатах досліджень [5-7] (за винятком [4]) не дано характеристики жорсткості вузла скріплення типу КПП-5.

Визначення мети та задачі дослідження. Просторова жорсткість проміжних скріплень є складовою загальної просторової жорсткості підрейкової основи та впливає на роботу всієї конструкції колії під дією динамічного й вібраційного поїзного навантаження.

У роботі [3] розглянута вертикальна жорсткість вузла скріплення КПП-5 і дано числові характеристики жорсткостей пружних елементів цього скріплення. Однак як підрейкова прийнята гумова прокладка, що не відповідає типовій конструкції цього скріплення [2].

У запропонованій статті зроблено спробу математичного моделювання пружної роботи скріплення КПП-5 під дією вертикальних і горизонтальних поперечних (бічних) сил.

Основна частина дослідження. При дії на рейку вертикальних і бічних сил відбувається її вигин у вертикальній і горизонтальній площині та її крутіння. Складовими реакцій рейкових опор є вертикальні і горизонтальні реакції рейкових скріплень і реактивні крутні моменти. Тому розглянемо вертикальну й горизонтальну поперечну жорсткість скріплення типу КПП-5 при вигинах і його жорсткість при крутінні рейки.

Вертикальна жорсткість скріплення КПП-5. При монтажі вузла скріплення КПП-5 відбувається початкова вертикальна деформація пружинної клеми $y_{кл}^{поч}$ (рис. 1), яка може досягати, з урахуванням конструктивних розмірів клем, анкерів, прокладок, ізолюючого вкладиша та підошви рейки, 6 мм. При цьому кожна клема притискає підошву рейки до шпали із силою $Q_{кл}^{поч}$

$$Q_{кл}^{поч} = y_{кл}^{поч} Ж_{кл},$$

де $Ж_{кл}$ – жорсткість клеми при вертикальних деформаціях, кН/мм.

Під дією цих сил підрейкова прокладка стискується та чинить пружний опір цьому стиску

$$Q_{пр} = U_{пр}^{ст} y,$$

де $U_{пр}^{ст}$ – жорсткість прокладки при статичному стиску, кН/мм;

y – деформація прокладки при стиску, мм.

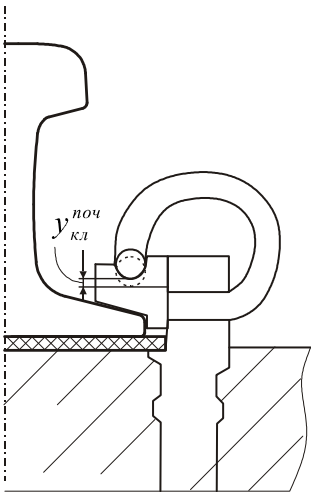

Рис. 1. Початкова вертикальна деформація пружинної клеми

Силу $Q_{пр}$ можна подати (рис. 2) у вигляді розподіленого пружного опору стиску з інтенсивністю $q_{пр}$, кН/мм,

$$q_{пр}^{м} = \frac{Q_{пр}^{м}}{b},\ q_{пр}^{дин} = \frac{Q_{пр}^{дин}}{b},$$

де b – ширина підошви рейки, мм;

$Q_{пр}^{м}$ – сила, з якою дві клеми стискають прокладку при монтажі вузла скріплення;

$Q_{пр}^{дин}$ – сила стиску прокладки при динамічному навантаженні.

Рівновага у вузлі скріплення буде тоді, коли остаточні монтажні сили клемного притиснення будуть дорівнювати пружному опору прокладки стиску:

$$2Q_{кл}^{м} = Q_{пр}^{м} = q_{пр}^{м} b. \qquad (1)$$

Остаточна монтажна сила клемного притиснення $Q_{кл}^{м}$ зменшується в порівнянні з величиною $Q_{кл}^{поч}$ у результаті зворотної пружної деформації клем за рахунок стиску підрейкової прокладки на величину $y_{пр}^{м}$:

$$Q_{кл}^{м} = \left(y_{кл}^{поч} - y_{пр}^{м}\right) \cdot Ж_{кл}.$$

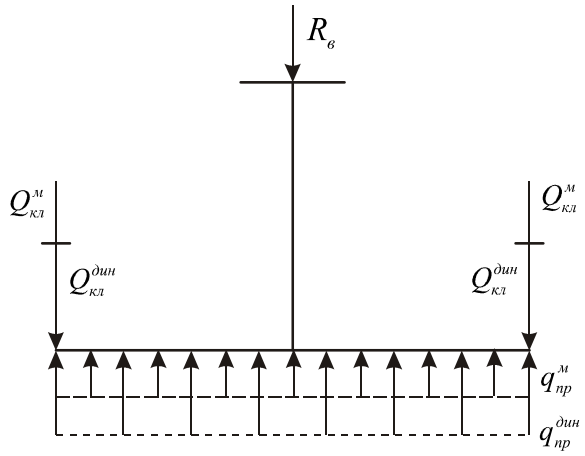

Рис. 2. Розрахункова схема при дії вертикальної сили

Опір прокладки стиску можна виразити через жорсткість прокладки при статичному стиску:

$$Q_{пр}^{м} = q_{пр}^{м} \cdot b = y_{пр}^{м} \cdot U_{пр}^{ст}.$$

Тоді вираз (1) буде мати такий вигляд:

$$2\left(y_{кл}^{поч} - y_{пр}^{м}\right) \cdot Ж_{кл} = y_{пр}^{м} \cdot U_{пр}^{ст}. \qquad (2)$$

При дії на вузол скріплення динамічної вертикальної сили $R_в$ умову рівноваги сил (рис. 2) можна записати як

$$R_в = Q_{пр}^{дин} - 2Q_{кл}^{дин}. \qquad (3)$$

Опір прокладки $Q_{пр}^{дин}$ при дії сили $R_в$ збільшується при її додатковому динамічному стиску на величину Δy:

$$Q_{пр}^{дин} = \Delta y \cdot U_{пр}^{дин} + y_{пр}^{м} \cdot U_{пр}^{ст}, \qquad (4)$$

де $U_{пр}^{дин}$ – жорсткість підрейкової прокладки при динамічному стиску, кН/мм.

Сила клемного притиснення при дії $R_в$ зменшується за рахунок зворотної пружної деформації клем на величину Δy

$$Q_{кл}^{дин} = \left(y_{кл}^{поч} - y_{пр}^{м}\right) \cdot Ж_{кл} - \Delta y \cdot Ж_{кл}. \qquad (5)$$

Тоді формулу (3) можна подати у вигляді

$$R_в = \Delta y U_{пр}^{дин} + y_{пр}^{м} U_{пр}^{ст} - 2\left(y_{кл}^{поч} - y_{пр}^{м}\right) Ж_{кл} + 2\Delta y Ж_{кл}.$$

Заміняючи в цій формулі $2\left(y_{кл}^{поч} - y_{пр}^{м}\right) Ж_{кл}$ на $y_{пр}^{м} U_{пр}^{ст}$ з виразу (2), одержимо

$$R = \Delta y\left(U_{пр}^{дин} + 2Ж_{кл}\right).$$

Або переходячи до вертикальної жорсткості вузла скріплення $C_y = \dfrac{R_в}{\Delta y}$, остаточно одержимо

$$C_y = U_{пр}^{дин} + 2Ж_{кл}. \qquad (6)$$

Горизонтальна поперечна жорсткість скріплення КПП-5. Горизонтальна поперечна жорсткість скріплення C_z, кН/мм, під дією бічної сили R_z визначається як

$$C_z = \frac{R_z}{\Delta z}, \qquad (7)$$

де Δz – пружне бічне переміщення підошви рейки, мм.

Умова рівноваги сил у вузлі скріплення при дії бічної сили R_z (рис. 3)

$$R_z = 2F_{тр}^{кл} + F_{тр}^{пр} + Q_z^{вк}, \qquad (8)$$

де $F_{тр}^{кл}$ – сила тертя вкладиша по верхній грані підошви рейки, кН;

$F_{тр}^{пр}$ – сила тертя підошви рейки по прокладці, кН;

$Q_z^{вк}$ – сила опору бічному переміщенню підошви рейки частини ізолюючого вкладиша між підошвою й анкером, кН.

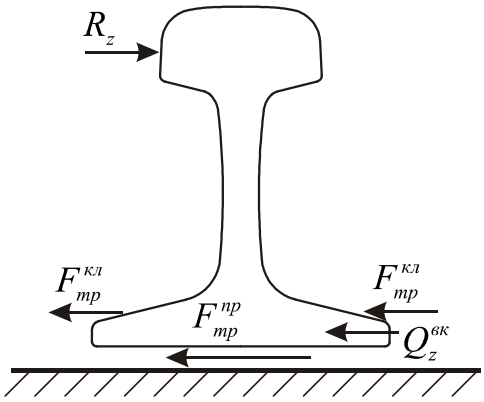

Рис. 3. Умова рівноваги сил у вузлі скріплення при дії бічної сили

У формулі (8) пружною буде тільки сила $Q_z^{вк}$

$$Q_z^{вк} = \Delta z \cdot U_z^{вк},$$

де $U_z^{вк}$ – жорсткість частини вкладиша при бічних переміщеннях підошви, кН/мм.

Сили тертя $F_{тр}^{кл}$ і $F_{тр}^{пр}$ можна подати з урахуванням формул (2), (4), (5) як:

$$F_{тр}^{кл} = f_м Q_{кл}^{дин} = f_м\left[\left(y_{кл}^{поч} - y_{пр}^{м}\right) Ж_{кл} - \Delta y Ж_{кл}\right] = f_м\left(\frac{1}{2} y_{пр}^{м} U_{пр}^{ст} - \Delta y Ж_{кл}\right);$$

$$F_{тр}^{пр} = f_п Q_п^{дин} = f_п\left(y_{пр}^{м} U_{пр}^{ст} + \Delta y U_{пр}^{дин}\right),$$

де $f_м$, $f_п$ – коефіцієнти тертя вкладиша по підошві рейки (поліамід-сталь) і підошви по прокладці (сталь-поліуретан).

Інші позначення залишилися без змін. Тоді формула (8) буде мати вигляд

$$R_z = f_м y_{пр}^{м} U_{пр}^{ст} - 2 f_м \Delta y Ж_{кл} + f_п y_{пр}^{ст} U_{пр}^{ст} + f_п U_{пр}^{дин} + \Delta z U_z^{вк}.$$

Після перетворень

$$R_z = y_{пр}^{м} U_{пр}^{ст} \left(f_м + f_п \right) + \Delta y \left(f_п U_{пр}^{дин} - 2 f_м Ж_{кл} \right) + \Delta z U_z^{вк}.$$

Переходячи до горизонтальної поперечної жорсткості вузла скріплення (7), одержимо

$$C_z = \frac{y_{пр}^{м}}{\Delta z} U_{пр}^{ст} \left(f_м + f_п \right) + \frac{\Delta y}{\Delta z} \left(f_п U_{пр}^{дин} - 2 f_м Ж_{кл} \right) + U_z^{вк}. \quad (9)$$

Оскільки ізолюючі вкладиші виготовляються із достатньо твердого матеріалу (поліамід) $U_z^{кр} >> U_{пр}^{дин} > U_{пр}^{ст}$ бічні переміщення підошви рейки набагато менші від вертикальних $\Delta z << \Delta y$. Таким чином, $\frac{y_{пр}^{м}}{\Delta z} \to \infty$, $\frac{\Delta y}{\Delta z} \to \infty$ і можна чекати, що $C_z \to \infty$.

Жорсткість скріплення КПП-5 при крутінні. При дії на вузол скріплення крутного моменту $M_{кр}$ переріз рейки повернеться на кут $\Delta\varphi$, величину якого, у виді його малості, можна визначити як (рис. 4), рад:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{b}, \quad (10)$$

де Δy_1 і Δy_2 – додаткові переміщення кромки підошви рейки при повороті перерізу, мм;

b – ширина підошви рейки, мм.

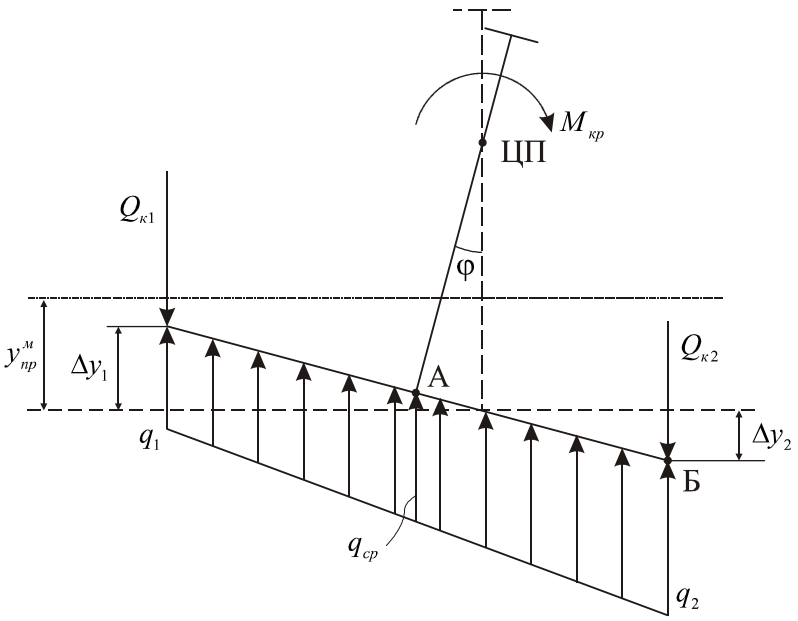

Рис. 4. Розрахункова схема при крутінні рейки

Жорсткість вузла скріплення при крутінні, кН/рад:

$$C_ц = \frac{M_{кр}}{\Delta\varphi}. \qquad (11)$$

Умова рівноваги моменту $M_{кр}$, моментів реактивних опорів клем $Q_{к1}$ і $Q_{к2}$, моментів нерівномірно розподіленого реактивного опору підрейкової прокладки щодо центра повороту перерізу (ЦП) (рис. 4) визначається як

$$M_{кр} + Q_{к2}\frac{b}{2} - \frac{q_2 - q_{ср}}{2}\frac{b^2}{8} + \frac{q_1 + q_{ср}}{2}\frac{b^2}{8} - Q_{к1}\frac{b}{2} = 0.$$

Після перетворення одержимо

$$M_{кр} = \left(Q_{к1} - Q_{к2}\right)\frac{b}{2} + \left(q_2 - q_1\right)\frac{b^2}{16}, \qquad (12)$$

де $Q_{к1}$ і $Q_{к2}$ – сили клемних натискань, кН, при повороті перерізу;

q_1 і q_2 – інтенсивності нерівномірного розподілу реакції опору підрейкової прокладки при нерівномірному її стиску, кН/мм.

Сили натискання клем при повороті перерізу можна визначити як

$$Q_{к1} = Q_{кл}^{м} + \Delta Q_{к1} = Q_{кл}^{м} + Ж_{кл}\Delta y_1$$
$$Q_{к2} = Q_{кл}^{м} + \Delta Q_{к2} = Q_{кл}^{м} + Ж_{кл}\Delta y_2$$

Тоді різниця $\left(Q_{к1} - Q_{к2}\right)$ у формулі (12) буде дорівнювати

$$\left(Q_{к1} - Q_{к2}\right) = Ж_{кл}\left(\Delta y_1 + \Delta y_2\right).$$

Аналогічно для різниці значень $\left(q_1 - q_2\right)$ з урахуванням викладеного вище можна одержати

$$\left(q_1 - q_2\right) = \frac{U_{пр}^{дин}}{b}\left(\Delta y_1 - \Delta y_2\right).$$

Тоді формула (12) буде мати вигляд

$$M_{кр} = Ж_{кл}\left(\Delta y_1 + \Delta y_2\right)\frac{b}{2} + U_{пр}^{дин}\frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{b}\frac{b^2}{16}.$$

Підставляючи значення $\Delta\varphi$ з рівняння (10), одержимо

$$M_{кр} = Ж_{кл}\Delta\varphi\frac{b^2}{2} + U_{пр}^{дин}\Delta\varphi\frac{b^2}{16}.$$

Переходячи до жорсткості скріплення при крутінні (11), одержимо

$$C_ц = Ж_{кл}\frac{b^2}{2} + U_{пр}^{дин}\frac{b^2}{16}.$$

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Таким чином, отримані рівняння (6), (9), (13) дають змогу подати просторові жорсткості вузла скріплення КПП-5 як функції величини жорсткостей пружних елементів цього скріплення.

Подальша робота над цією проблемою дає можливість отримати більш точні дані процесів, які відбуваються у вузлах скріплень КПП-5 під дією зовнішніх факторів, що дає можливість у свою чергу розробити більш ефективну нормативну документацію, яка сприятиме подовженню терміну служби колії і всіх її елементів під дією динамічного і вібраційного навантаження від рухомого складу.

Список використаних джерел

1. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України [Текст] / Е.І. Даніленко, В.О. Яковлєв, А.М. Орловський та ін. – К.: Транспорт України, 2006. – 336 с.

2. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість (ЦП-0117) [Текст] / Е. І. Даниленко, В. В. Рибкін. – К.: Транспорт України, 2006. – 168 с.

3. Інструкція з укладання та утримання рейкової колії з рейками типу Р65, UIC 60 і пружним проміжним скріпленням типу КПП-5 та високоміцними ізолюючими стиками (ЦП-0104) [Текст]. – К., 2003. – 52 с.

4. Говоруха, В. В. Механика деформирования и разрушения упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений [Текст]: монография / В. В. Говоруха. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2005. – 388 с.

5. Effects of profile wear on wheel–rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout [Electronic resource] / J. Xu, P. Wang, L. Wang, R. Chen // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8, №1. – P. 1-14. – Available at: http://ade.sagepub.com/ content/8/1/ 1687814015623696.full.pdf+html. – Title from the screen. – Accessed: 14.03.2016.

6. Kim, S. J. A Study on the Running Safety of F26 Turnout and Vehicle Model [Electronic resource] / S. J. Kim, B.-G. Eom, H. S. Lee // International Journal of Railway. – 2012. – Vol. 5, № 4. – P. 156-162. – Available at: http://www.ijr.or. kr/On_line/admin/files/(156- 162)-12-024.pdf. – Title from the screen. – Accessed: 15.03.2016.

7. Herian, J. Modelling of structure and properties of pearlitic steel and abrasive wear of the turnout frog in the cyclic loading conditions [Electronic resource] / J. Herian, K. Aniołek // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2011. – Vol. 49, Iss. 1. – P. 71-81. – Available at: http://www.journalam-me.org/ papers_ vol49_1/4918.pdf. – Title from the screen. – Accessed: 15.03.2016.

Даренський Олександр Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту Тел.: 730-10-59. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.
Потапов Дмитро Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 730-10-59. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.
Кулік Станислав Вікторович, інженер, начальник Куп’янськ-Вузлової дистанції колії, Південна залізниця. Тел.: 730-10-59. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Darenskiy Olexander Mykolaevich, Dr. Tech. Sc., Professor of Department "Road and Track Facilities" Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 730-10-59.
Potapov Dmytro Oleksandrovich, Ph.d. (Tech.), Associated Professor of Department "Road and Track Facilities" Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 730-10-59.
Kulik Stanislav Viktorovich, engineer, chief Coup'yansc - Knot distance of track (Coup'yansc), Southern Railway. Tel.: 730-10-59.

Стаття прийнята 11.05.2017 р.