

УДК 004.89

ПРОСТОРОВА ЖОРСТКІСТЬ ПРОМІЖНОГО СКРІПЛЕННЯ ТИПУ КПП-5

Д-р техн. наук О.М. Даренський, канд. техн. наук В.Г. Вітольберг, І.Л. Копилов

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЖОСТКОСТЬ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СКРЕПЛЕНИЯ ТИПА КПП-5

Д-р техн. наук А.Н. Даренский, канд. техн. наук В.Г. Витольберг, И.Л. Копылов

SPATIAL ZHOSTKOST INTERMEDIATE FASTENINGS TYPE KPP-5

Doct. of techn. sciences A.N. Darenskiy, cand. of techn. science V.G. Vitolberg, I.L. Kopylov

Отримано математичні залежності жорсткості вузла скріплення типу КПП-5 при вертикальному і горизонтальному вигинах і крученні рейки під дією бічних сил як функції жорсткості пружних елементів скріплення.

Ключові слова: рейкові скріплення типу КПП-5, просторова жорсткість.

Получены математические зависимости пространственной жесткости узла скрепления типа КПП-5 при вертикальном и горизонтальном изгибе, а также при кручении рельса под действием боковых сил как функции жесткостей элементов скрепления.

Ключевые слова: рельсовые скрепления типа КПП-5, пространственная жесткость.

Mathematical dependences of spatial rigidity of unit of a fastening of type of a check KPP-5 are received at a vertical and horizontal bend, and as at torsion of a rail under action of lateral forces as functions rigidity elements of a fastening.

Keywords: rail fastening type of check KPP-5, horizontal bend.

Вступ. Проміжні рейкові скріплення типу КПП-5 дозволено до застосування на залізницях України з 2003 року. Нормативні документи [1-4] 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-діляниць або перегону (наддовгі пліті).

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 (враховуючи анкери складовою частиною шпали С-3-0), у скріпленні КБ – 21 елемент.

Відсутність у скріпленні КПП-5 нарізних сполучень повинне істотно підвищити стабільність притиснення рейки до шпал, опірність силам уgonу.

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

Аналіз досліджень і публікацій. Ні в діючих нормативних документах [1-4], а також в опублікованих за останні роки результатах досліджень (за винятком [5]) не дані характеристики жорсткості вузла скріплення типу КПП-5. Тим часом, 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 [5] 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 [4].

Постановка проблеми. У статті зроблена спроба математичного моделювання пружної роботи скріплення КПП-5 під дією вертикальних і горизонтальних поперечних (бічних) сил.

Основна частина. При дії на рейку вертикальних і бічних сил відбувається її вигин у вертикальній і горизонтальній площині та її кручення. 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 крученні 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 підшви рейки 6 мм. При цьому кожна клема притискає підшву 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.

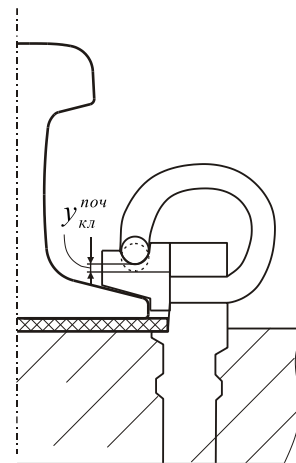


Рис. 1. Початкова вертикальна деформація пружинної клеми

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

$$Q_{np} = U_{np}^{cm} y,$$

де U_{np}^{cm} – жорсткість прокладки при статичному стиску, кН/мм;

y – деформація прокладки при стиску, мм.

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

$$q_{np}^m = \frac{Q_{np}^m}{b}, \quad q_{np}^{дин} = \frac{Q_{np}^{дин}}{b},$$

де b – ширина підшви рейки, мм;

Q_{np}^M – сила, з якою дві клема стискають прокладку при монтажі вузла скріплення;

$Q_{np}^{\partial ин}$ – сила стиску прокладки при динамічному навантаженні.

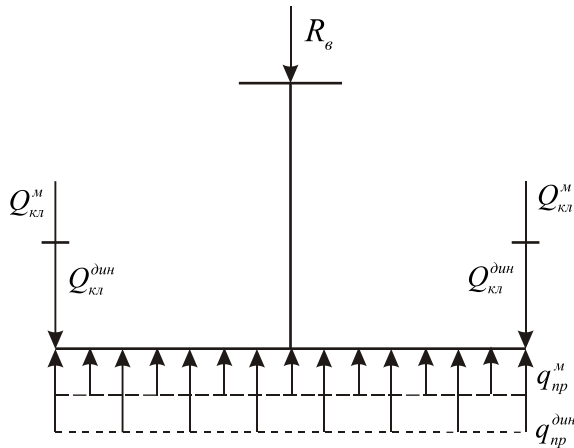


Рис. 2. Розрахункова схема при дії вертикальної сили

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

$$2Q_{кл}^M = Q_{np}^M = q_{np}^M b. \quad (1)$$

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

$$R_{г} = \Delta y U_{np}^{\partial ин} + y_{np}^M U_{np}^{cm} - 2(y_{кл}^{пoch} - y_{np}^M) \mathcal{K}_{кл} + 2\Delta y \mathcal{K}_{кл}.$$

Заміняючи в цій формулі $2(y_{кл}^{пoch} - y_{np}^M) \mathcal{K}_{кл}$ на $y_{np}^M U_{np}^{cm}$ з виразу (2), одержимо

$$R = \Delta y (U_{np}^{\partial ин} + 2 \mathcal{K}_{кл}).$$

$$Q_{кл}^M = (y_{кл}^{пoch} - y_{np}^M) \cdot \mathcal{K}_{кл}.$$

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

$$Q_{np}^M = q_{np}^M \cdot b = y_{np}^M \cdot U_{np}^{cm}.$$

Тоді вираз (1) буде мати вигляд

$$2(y_{кл}^{пoch} - y_{np}^M) \cdot \mathcal{K}_{кл} = y_{np}^M \cdot U_{np}^{cm}. \quad (2)$$

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

$$R_{г} = Q_{np}^{\partial ин} - 2Q_{кл}^{\partial ин}. \quad (3)$$

Опір прокладки $Q_{np}^{\partial ин}$ при дії сили $R_{г}$ збільшується при її додатковому динамічному стиску на величину Δy :

$$Q_{np}^{\partial ин} = \Delta y \cdot U_{np}^{\partial ин} + y_{np}^M \cdot U_{np}^{cm}, \quad (4)$$

де $U_{np}^{\partial ин}$ – жорсткість підрейкової прокладки при динамічному стиску, кН/мм.

Сила клемного притиснення при дії $R_{г}$ зменшується за рахунок зворотної пружної деформації клем на величину Δy

$$Q_{кл}^{\partial ин} = (y_{кл}^{пoch} - y_{np}^M) \cdot \mathcal{K}_{кл} - \Delta y \cdot \mathcal{K}_{кл}. \quad (5)$$

Тоді формулу (3) можна подати у вигляді

Або переходячи до вертикальної жорсткості вузла скріплення $C_y = \frac{R_{г}}{\Delta y}$, остаточно одержимо

$$C_y = U_{np}^{\partial ин} + 2 \mathcal{K}_{кл}. \quad (6)$$

Горизонтальна поперечна жорсткість скріплення КПП-5

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

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

де Δz – пружне бічне переміщення підшви рейки, мм.

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

$$R_z = 2F_{mp}^{кл} + F_{mp}^{np} + Q_z^{БК}, \quad (8)$$

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

F_{mp}^{np} – сила тертя підшви рейки по прокладці, кН;

$Q_z^{БК}$ – сила опору бічному переміщенню підшви рейки частини ізолюючого вкладиша між підшвою й анкером, кН.

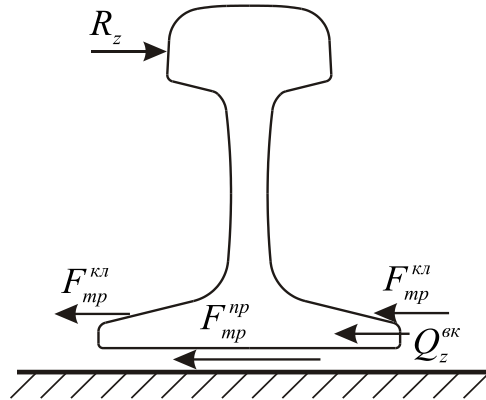


Рис. 3. Умова рівноваги сил у вузлі скріплення при дії бічної сили

У формулі (8) пружною буде тільки сила

$Q_z^{БК}$

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

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

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

$$F_{mp}^{кл} = f_m Q_{кл}^{\partial_{ин}} = f_m [(y_{кл}^{noch} - y_{np}^m) \mathcal{K}_{кл} - \Delta y \mathcal{K}_{кл}] = f_m \left(\frac{1}{2} y_{np}^m U_{np}^{cm} - \Delta y \mathcal{K}_{кл} \right);$$

$$F_{mp}^{np} = f_n Q_n^{\partial_{ин}} = f_n (y_{np}^m U_{np}^{cm} + \Delta y U_{np}^{\partial_{ин}}),$$

де f_m , f_n – коефіцієнти тертя вкладиша по підшві рейки (поліамід-сталь) і підшви по прокладці (сталь-поліуретан).

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

$$R_z = f_m y_{np}^m U_{np}^{cm} - 2f_m \Delta y \mathcal{K}_{кл} + f_n y_{np}^m U_{np}^{cm} + f_n U_{np}^{\partial_{ин}} + \Delta z U_z^{БК}.$$

Після перетворень

$$R_z = y_{np}^m U_{np}^{cm} (f_m + f_n) + \Delta y (f_n U_{np}^{\partial_{ин}} - 2f_m \mathcal{K}_{кл}) + \Delta z U_z^{БК}.$$

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

$$C_z = \frac{y_{np}^m}{\Delta z} U_{np}^{cm} (f_m + f_n) + \frac{\Delta y}{\Delta z} (f_n U_{np}^{\partial_{ин}} - 2f_m \mathcal{K}_{кл}) + U_z^{БК}. \quad (9)$$

Оскільки ізолюючі вкладиші виготовляються із достатньо твердого матеріалу (поліамід) $U_z^{kp} \gg U_{np}^{din} > U_{np}^{ст}$, бічні переміщення підшви рейки набагато менше вертикальних $\Delta z \ll \Delta y$. Таким чином,

$$\frac{y_{np}^M}{\Delta z} \rightarrow \infty, \quad \frac{\Delta y}{\Delta z} \rightarrow \infty \text{ і можна чекати, що } C_z \rightarrow \infty.$$

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

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

де Δy_1 і Δy_2 – додаткові переміщення кромки підшви рейки при повороті перерізу, мм;
 b – ширина підшви рейки, мм.

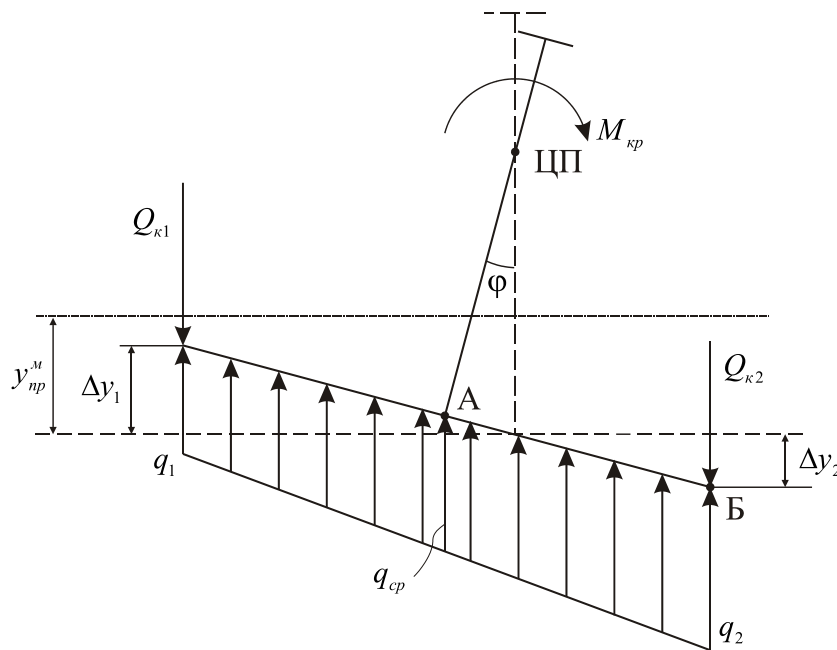


Рис. 4. Розрахункова схема при крученні рейки

Жорсткість вузла скріплення при крученні, кН/рад

$$C_{\varphi} = \frac{M_{кр}}{\Delta\varphi}. \quad (11)$$

Умова рівноваги моменту $M_{кр}$, моментів реактивних опорів клем $Q_{\kappa 1}$ і $Q_{\kappa 2}$, моментів нерівномірно розподіленого реактивного опору підрейкової прокладки щодо центра повороту перерізу (ЦП) (рис. 4) визначається як

$$M_{кр} + Q_{\kappa 2} \frac{b}{2} - \frac{q_2 - q_{cp}}{2} \frac{b^2}{8} + \frac{q_1 + q_{cp}}{2} \frac{b^2}{8} - Q_{\kappa 1} \frac{b}{2} = 0.$$

Після перетворення одержимо

$$M_{кр} = (Q_{\kappa 1} - Q_{\kappa 2}) \frac{b}{2} + (q_2 - q_1) \frac{b^2}{16}, \quad (12)$$

де $Q_{\kappa 1}$ і $Q_{\kappa 2}$ – 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

$$\begin{aligned} Q_{\kappa 1} &= Q_{\kappa l}^M + \Delta Q_{\kappa 1} = Q_{\kappa l}^M + \mathcal{K}_{\kappa l} \Delta y_1 \\ Q_{\kappa 2} &= Q_{\kappa l}^M + \Delta Q_{\kappa 2} = Q_{\kappa l}^M + \mathcal{K}_{\kappa l} \Delta y_2 \end{aligned}$$

Тоді різниця $(Q_{\kappa 1} - Q_{\kappa 2})$ у формулі (12) буде дорівнювати

$$(Q_{\kappa 1} - Q_{\kappa 2}) = \mathcal{K}_{\kappa l} (\Delta y_1 + \Delta y_2).$$

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

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

Тоді формула (12) буде мати вигляд

$$M_{\kappa p} = \mathcal{K}_{\kappa l} (\Delta y_1 + \Delta y_2) \frac{b}{2} + U_{np}^{дин} \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{b} \frac{b^2}{16}.$$

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

$$M_{\kappa p} = \mathcal{K}_{\kappa l} \Delta \varphi \frac{b^2}{2} + U_{np}^{дин} \Delta \varphi \frac{b^2}{16}.$$

Переходячи до жорсткості скріплення при крученні (11), одержимо

$$C_{\varphi} = \mathcal{K}_{\kappa l} \frac{b^2}{2} + U_{np}^{дин} \frac{b^2}{16}.$$

Висновки з дослідження. Таким чином, отримані рівняння (6), (9), (13), які дають змогу подати просторові жорсткості вузла скріплення КПП-5 як функції величини жорсткостей пружних елементів цього скріплення.

Список використаних джерел

1. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України [Текст] / Е.І. Даниленко, В.О. Яковлев, А.М. Орловський, [та ін.]. – К.: Транспорт України, 2006. – 336 с.
2. Даниленко, 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: Изд. «Лира ЛТД», 2005. – 388 с.

Даренський Олександр Миколайович, д-р техн. наук., професор кафедри колії та колійного господарства Української державної академії залізничного транспорту. Тел.:(057) 723-12-34.
 Вітольберг Володимир Геннадійович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри колії та колійного господарства Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: 730-10-60.
 Копилов Ігор Леонідович, магістрант ІППК. Тел.: (099) 425-10-68.

Darensky Oleksandr Mykolajovych, Ph.D., Professor of the Department "road and track facilities" Ukraine State of Railway Transport. Tel.:(057) 723-12-34.
 Vitolberg Vladimir Gennadievich, cand. of techn. science Department "Road and track facilities" Ukraine State of Railway Transport Tel.:(057) 730-10-60
 Kopylov Igor Leonidovich Master Training Institute. Tel: (099) 425-10-68.