УДК 625.143 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.162.2016.78334

ЖОРСТКІСТЬ СКРІПЛЕНЬ ТРЕП-Ш ТА ТРЕП ПРИ КРУЧЕННІ РЕЙКИ

Старш. викл. Е. А. Бєліков

ЖЕСТКОСТЬ СКРЕПЛЕНИЯ ТРЕП-Ш И ТРЕП ПРИ КРУЧЕНИИ РЕЛЬСА

Старш. препод. Э. А. Беликов

THE STIFFNESS OF THE BOND TRAP-N AND TRAP TORSIONAL RAIL

Senior lecturer E.A.Byelikov

У статті розглянуто основні навантаження, що діють на скріплення типу ТРЕП та ТРЕП-Ш при крученні рейки під дією горизонтальних поперечних сил і дією вертикальних сил. Складені розрахункові схеми і емпіричні залежності роботи вузла скріплення. Базові математичні викладки є математичним подовженням просторової моделі взаємодії сил, що діють на верхню будову колії, розробленої в УкрДУЗТ для умов залізниць незагального користування. Подані математичні моделі дають можливість визначати в різних умовах експлуатації жорсткості скріплень ТРЕП та ТРЕП-Ш при крученні рейки під дією горизонтальних поперечних сил.

Ключові слова: *рівновага сил, бічна сила, сила тертя ізолюючого вкладиша, пружний опір підрейкової прокладки, сила опору поперечному переміщенню підошви рейки, жорсткість вкладиша, жорсткість підрейкової прокладки, коефіцієнт тертя вкладиша по підошві рейки, сила клемного натискання, пружні динамічні вертикальні деформації, сила монтажного натискання клеми.*

В статье рассмотрены основные нагрузки, которые действуют на скрепления типа ТРЕП-Ш и ТРЕП при кручении рельса под действием горизонтальных поперечных сил и действием вертикальных сил. Составлены расчетные схемы и емпирические зависимости работы узла скрепления. Базовые математические выкладки являются математическим продолжением пространственной модели взаимодействия сил, действующих на верхнее строение пути, разработанной в УкрДУЗТ для условий железных дорог необщего пользования. Представленные математические модели дают возможность определять в различных условиях эксплуатации жесткость скреплений ТРЕП и ТРЕП-Ш при кручении рельса под действием горизонтальных поперечных сил.

Ключевые слова: *равновесие сил, боковая сила, сила трения изолирующего вкладыша, упругое сопротивление подрельсовой прокладки, сила сопротивления поперечному перемещению подошвы рельса, жесткость вкладыша, жесткость подрельсовой прокладки, коэффициент трения вкладыша по подошве рельса, сила клеммного нажатия, упругие динамические вертикальные деформации, сила монтажного нажатия клеммы.*

The article describes the main load, which is operating on bonds-type TRAP-N and the TRAP torsional rail under the action of horizontal shear forces and vertical forces actions. Composed design diagram and empiricheskie according to work site bonds. Basic mathematical calculations is a mathematical prodoljeniem spatial model of interaction forces acting on the superstructure, designed in Ukjust for the conditions of the Railways of uncommon use. The mathematical models make it possible to determine various operating conditions of the bonds jetcost TRAP-N and the TRAP torsional rail under the action of horizontal shear forces.

Keywords: *the balance of power, the lateral force, the friction force of the insulating liner elastic resistance under-rail pads, the resistance force lateral movement of the rail foot, the stiffness of the liner, under-rail pad stiffness, friction pad on the sole of the rail, the power of the terminal is pressed, the elastic dynamic vertical deformation, the force pushing the mounting terminals.*

Вступ. Експлуатація та утримання колії промислових залізниць значно відрізняються від магістральних колій загального користування. Найбільш проблемними є вузли прикріплення рейок до залізобетонних шпал. На цей час практично єдиним типом проміжних скріплень в таких умовах є скріплення КБ. Цей тип скріплення має суттєві недоліки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у вирішення питань взаємодії рухомого складу та колії належить науковим школам, які сформували професори В.І. Ангелейко [1], Е.І. Даниленко [2], В.В. Рибкін [3], академік В.А. Лазарян [4] та професори М.А. Фрішман [5], М.Ф. Веріго [6], С.П. Першин [7], В.Ф. Яковлєв [8], А.Я. Коган [9,10].

Слід відзначити, що в цих дослідженнях використовувалася загальна розрахункова схема колії у вигляді балки на суцільній пружній основі. Ця схема передбачає стабільність пружних дисипативних характеристик підрейкової основи. Однак аналіз, зроблений у роботі [11] показав, що така схема для умов промислового транспорту надмірно ідеалізує колію та її технічний стан.

В роботах [11,12,13,14,15] розроблені моделі та методи досліджень сил взаємодії рухомого складу і колії, а також розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії з застосуванням просторової розрахункової схеми колії у вигляді балок-рейок, які впливають на пружно-дисипативні опори-шпали з нелінійними характеристиками.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою статті є знаходження математичного рівняння, яке враховувало б один з параметрів жорсткості скріплення ТРЕП та ТРЕП-Ш при крученні рейки під дією горизонтальних поперечних сил і дії вертикальних сил та необхідних експериментальних параметрів .

Основна частина дослідження

Жорсткість скріплення ТРЕП-Ш. Жорсткість вузла скріплення при крученні рейки під дією горизонтальних поперечних сил і дією вертикальних сил з урахуванням послідовного з'єднання жорсткостей першої і другої системи дорівнює

$$C_{\varphi} = \frac{C_{\varphi 1} \cdot C_{\varphi 2}}{C_{\varphi 1} + C_{\varphi 2}}, \qquad (1)$$

де $C_{\varphi}, C_{\varphi 1}, C_{\varphi 2}$ – жорсткість при крученні системи «підрейкова прокладка – клема» (перша система).

Розглянемо дію обертального згинального моменту $M_{кр}$ на першу систему (рис. 1).

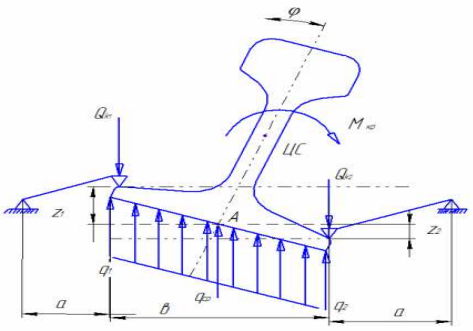

Рис. 1. Розрахункова схема для визначення жорсткості при крученні системи "підрейкова прокладка – пружна клема"

Умову рівноваги зовнішнього обертального моменту $M_{кр}$, моментів сил клемного натиснення і моменту нерівномірно розподіленої реакції підрейкової прокладки щодо центру повороту перетину рейки (ЦП) можна записати так:

$$M_{кр} + Q_{к2} \cdot \frac{в}{2} - (q_2 + q_{ср}) \cdot \frac{в^2}{16} + (q_{ср} + q_1) \cdot \frac{в^2}{16} - Q_{к1} \cdot \frac{в}{2} = 0, \quad (2)$$

Після перетворень одержимо

$$M_{кр} = (Q_{к1} - Q_{к2}) \cdot \frac{в}{2} + (q_2 - q_1) \cdot \frac{в^2}{16}, \quad (3)$$

де $Q_{к1}$ і $Q_{к2}$ - сила натиснення пружних клем, *кН*;

q_1 і q_2 - інтенсивності нерівномірно розподіленої реакції підрейкової прокладки при її стисненні пружними клемами і зовнішнім обертальним моментом $M_{кр}$, *кН/м*.

Сили натиснення клем на підошви рейки при сумісній дії на вузол скріплення вертикальних сил і обертальних моментів будуть дорівнювати

$$Q_{к1} = Q_к^{поч} - \Delta Q_к + \Delta Q_{кр1}$$
$$Q_{к2} = Q_к^{поч} - \Delta Q_к + \Delta Q_{кр2}, \quad (4)$$

де $Q_к^{поч}$ - монтажна сила натиснення пружних клем, *кН*;

$\Delta Q_к$ - зміна сили клемного натиснення при дії вертикальної сили на скріплення, *кН*;

$\Delta Q_{кр1}$, $\Delta Q_{кр2}$ - зміна сил клемного натиснення при крученні рейки, *кН*.

Позначимо зміну згинань кромок підошви рейки при її крученні через ΔZ_1 і ΔZ_2, м (рис. 1). Тоді величини $\Delta Q_{кр1}$ та $\Delta Q_{кр2}$ $\Delta Q_{кр1}$ з урахуванням характеру роботи дорівнюють

$$\Delta Q_{кр1} = Z_{у1} \cdot ж_{кл}$$
$$\Delta Q_{кр2} = Z_{у2} \cdot ж_{кл}, \quad (5)$$

де $ж_{кл}$ – жорсткість пружної клеми, *кН/м*.

Різницю величин $Q_{к1} - Q_{к2}$ у формулі (3) можливо записати так

$$Q_{к1} - Q_{к2} = ж_ш (\Delta z_1 + \Delta z_2), \quad (6)$$

Застосовуючи той же підхід для значень q_1 і q_2, отримуємо

$$q_1 - q_2 = u_{ППТ}^{дін} \cdot \left(\frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{в} \right), \quad (7)$$

Підставимо вирази (6) і (7) у формулу (3)

$$M_{кр} = C_{\varphi 1} \cdot \varphi_1, \quad (8)$$

Змінюючи в цьому виразі

$$\varphi_1 = \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{в} \quad (9)$$

та враховуючи min значення кута $Н \cdot м$, набудемо значення жорсткості першої системи при крученні рейки, залежно від характеристик пружних елементів

$$C_{\varphi 1} = \frac{в^2}{4} \cdot \left(ж_ш + \frac{u_{ППТ}^{дін}}{4} \right), \text{ кН/рад}, \quad (10)$$

де *в* – ширина підошви рейки, *м*.

Аналогічно розглядаючи жорсткість другої системи при крученні, можна одержати вираз (рис. 2)

$$C_{\varphi 2} = \frac{в^2}{4} ж_{кл} + \frac{d^2}{16} u_{ПНТ}^{дин}, \text{ кН/рад}, \qquad (11)$$

де d – довжина підкладки скріплення, *м*;

$u_{ПНТ}^{дин}$ - жорсткість нашпальної прокладки при стисненні динамічним навантаженням, *кН/м*; решта позначень загальна.

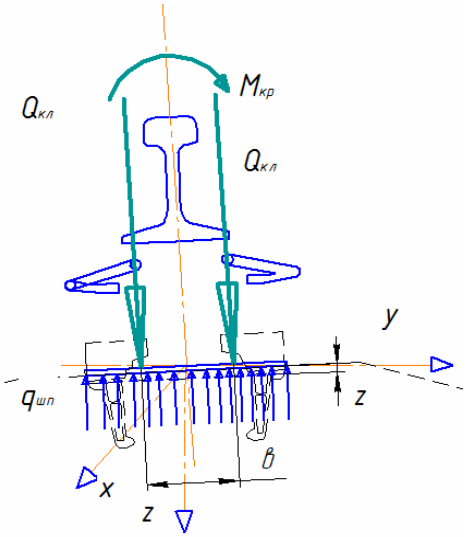

Рис. 2. Розрахункова схема для визначення жорсткості при крученні системи "нашпальна прокладка – пружні клеми"

Вирази (1, 7 і 10) дозволяють зробити висновок про те, що жорсткість скріплень ТРЕП при крученні рейки залежить лише від жорсткості прокладок і пружинних клем при їх стисненні.

Жорсткість скріплення ТРЕП. При дії на вузол скріплення обертального моменту $M_{кр}$ перетин рейки повернеться на кут $\Delta\varphi$, величину якого можна отримати (рис. 3)

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{в}, \qquad (12)$$

де Δz_1 й Δz_2 – додаткові переміщення кромок підошви рейки при повороті перетину, м;

в – ширина підошви рейки, м.

Жорсткість вузла скріплення при крученні:

$$C_\varphi = \frac{M_{кр}}{\Delta\varphi}, \text{ кН/рад}.$$

Умови рівноваги моменту $M_{кр}$, моментів сил клемного натискання $Q_{к1}$, $Q_{к2}$ і моменту нерівномірно розподіленого опору підрейкової прокладки стиску щодо центру повороту перетину рейки (ЦП) мають вигляд

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

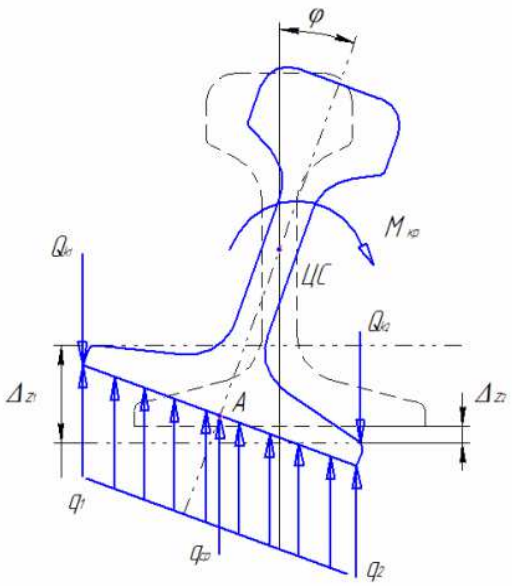

Рис. 3. Розрахункова схема для визначення жорсткості скріплення ТРЕП при крученні рейки

Після перетворень отримаємо

$$M_{кр} = (Q_{к2} - Q_{к1}) \cdot \frac{в}{2} + (q_2 - q_1) \cdot \frac{в^2}{16}, \qquad (13)$$

де $Q_{к1}$ й $Q_{к2}$ – сили натискання клем при повороті рейки, *кН*;

q_1 і q_2 – інтенсивності по кромках підошви нерівномірно розподіленого опору підрейкової прокладки при її нерівномірному стиску, *кН/м*.

Сили натискання клем при повороті рейки

$$Q_{к1} = Q_{кл}^{м} - \Delta Q_{к1} = Q_{кл}^{м} - ж_{кл} \cdot \Delta z_1;$$
$$Q_{к2} = Q_{кл}^{м} - \Delta Q_{к2} = Q_{кл}^{м} - ж_{кл} \cdot \Delta z_2.$$

Тоді

$$Q_{к2} - Q_{к1} = ж_{кл}\left(\Delta z_1 + \Delta z_2\right).$$

Аналогічно можно отримати

$$q_2 - q_1 = \frac{u_{ППТ}^{дин}}{в} \cdot \left(\Delta z_1 + \Delta z_2\right).$$

Тоді рівняння (13) буде мати вигляд

$$M_{кр} = ж_{кл}\left(\Delta z_1 + \Delta z_2\right) \cdot \frac{в}{2} + u_{ППТ}^{дин} \cdot \frac{\left(\Delta z_1 + \Delta z_2\right)}{в} \cdot \frac{в^2}{16}.$$

Підставляючи значення $\Delta\varphi$ з рівняння (1), отримаємо

$$M_{кр} = ж_{кл} \cdot \Delta\varphi \cdot \frac{в^2}{2} + u_{ППТ}^{дин} \cdot \Delta\varphi \cdot \frac{в^2}{16}.$$

Переходячи до жорсткості скріплення при обертанні,

$$C_{\varphi} = ж_{кл} \cdot \frac{в^2}{2} + u_{ППТ}^{дин} \cdot \frac{в^2}{16}, \text{ кН/рад.} \quad (14)$$

Таким чином, просторова жорсткість скріплення ТРЕП визначається жорсткістю пружинних клем $ж_{кл}$, жорсткістю підрейкових прокладок при стиску при статичному $u_{ППТ}^{ст}$ та динамічному $u_{ППТ}^{дин}$ навантаженні, жорсткістю ізолюючого вкладиша при зсуві рейки $u_{УП}$ та жорсткістю підрейкової прокладки при зсуві $u_{ППТ}^{Г}$

Аналіз формування просторових жорсткостей вузла скріпленнь ТРЕП та ТРЕП-Ш дозволив визначити необхідний перелік характеристик пружних елементів цього скріплення і перелік залежностей їх зміни в процесі експлуатації.

До таких характеристик і залежності слід віднести наступні:

- статична і динамічна жорсткість підрейкових і нашпальних при стисненні прокладок та їх зміні в процесі експлуатації;
- динамічна жорсткість підрейкових і нашпальних прокладок при зсуві в поперечному і поздовжньому напрямах і залежності цієї жорсткості від величини стиснення прокладок вертикальними силами;
- жорсткість пружних клем;
- жорсткість вкладиша при діючих переміщеннях рейки.

Ці характеристики і залежність можуть бути визначені експериментально.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Таким чином, складено математичні залежності (10,15) умов виявлення та формування жорсткостей вузла скріплення при крученні рейки під дією горизонтальних поперечних сил і дією вертикальних сил, яка залежить від статичної та динамічної жорсткості підрейкових і нашпальних при стисненні прокладок та їх змін в процесі експлуатації; динамічної жорсткості підрейкових і нашпальних прокладок при зсуві в поперечному і поздовжньому напрямах і залежності цієї жорсткості від величини стиснення прокладок вертикальними силами.

Список використаних джерел.

1. Ангелейко, В. И. Вывод основных уравнений для расчета рельса в горизонтальной и вертикальной плоскостях [Текст]: монография / В.И. Ангелейко. – Харьков: ХИИТ, 1958. – 38 с.

2. Даніленко, Е. І. Сучасні рейкові пружні скріплення і особливості вимог до вітчизняних скріплень на залізобетонних шпалах [Текст] / Е. І. Даніленко, М. Д. Костюк, О. М. Жученко // Залізничний транспорт України. – 2002. – № 6. – С. 3-12.

3. Рибкін, В. В. Теоретичні дослідження впливу пружності проміжних рейкових скріплень на деформативну роботу колії [Текст] / В. В. Рибкін, М. Д. Костюк, Н.П. Настечик, М. П. Сисин // Тези LXVI Міжнар. наук.-практ. конф. “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”. – Дніпропетровськ, 2006. – № 1. – С. 188.

4. Лазарян, В. А. Изибные колебания кузова полувагона в вертикальной и горизонтальной плоскостях [Текст] / В. А. Лазарян, В. Ф. Ушаков // Труды ДИИТ. – 1967. - №68. – С. 32-38.

5. Фришман, М. А. Экспериментальные определения жесткостей и неупругих сопротивлений пути [Текст] / М. А. Фришман, Л. Я. Воробейчик, Р. С. Липовской // Вестник ЦНИИ МПС. – 1970. - № 8. – С. 31- 35.

6. Вериго, М. Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава [Текст] / М.Ф. Вериго // Труды ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – №97. – С. 25-288.

7. Першин, С. П. Вертикальная жесткость пути и его надежность [Текст] / С. П. Першин // Путь и путевое хозяйство. – 1996. – №8. – С. 8-10.

8. Яковлев, В. Ф. Определение расчетных параметров пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью вибромашины [Текст] / В.Ф. Яковлев, И. И. Семенов, В. И. Абросимов // Труды ЛИИЖТа. – Л.: ЛИИЖТ, 1971. – Вып. 326. – С. 66-85.

9. Коган, А. Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь [Текст] / А. Я. Коган // Труды ЦИИТ МПС. – М.: Транспорт, 1969. – 206 с.

10. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную динамическую нагрузку [Текст]/ под ред. А.Я. Когана // Труды ВНИИЖТ. – 1973. – №502. – 80 с.

11. Даренский, А. Н. Результаты лабораторных испытаний скрепления типа КБ [Текст] / А. Н. Даренский // ЦНИИТЭИ МПС. – 1983. – № 2145. – С. 11.

12. Даренський, О. М. Визначення приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки при використанні розрахункової схеми як балки на пружних опорах з випадковими характеристиками [Текст] / О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць, В. Г. Вітольберг // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 115. – С. 151-162.

13. Даренський, О. М. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту [Текст]: монографія / О. М. Даренський. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 204 с.

14. Иванова, Л. И. Экспериментальные исследования перемещений элементов рельсошпальной решетки под поездной нагрузкой [Текст] / Л. И. Иванова, Н. И. Карпущенко // Труды НИИЖТ. – 1971. – № 129. – С. 61-67.

15. Bogacz R., Konowrocki R. On new effects of wheel-rail interaction //Archive of Applied Mechanics. – 2012. – Т. 82. – №. 10-11. – С. 1313-1323. http://link.springer.com/article/10.1007/s00419-012-0677-6.

Рецензент д-р техн. наук, професор О. М. Даренський

Бєліков Едуард Анатолійович, старший викладач, завідувач навчальної лабораторії секції кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 730-10-60, 22-10.

Byelikov Eduard Anatolyevich, senior lecturer, head of school laboratory section of the Department «Road and trak acilities» Ukrainian state University of railway transport. (730-10-60, 22-10).

Стаття прийнята 16.06.2016 р.