

ЗАЛІЗНИЧНІ СПОРУДИ ТА КОЛІЙНЕ ГОСПОДАРСТВО

УДК 625.143.5

Д-р техн. наук А.Н. Даренский,
Р.М. БабийСРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ СКРЕПЛЕНИЙ КБ И КПП-5
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ

Введение. Динамическое воздействие подвижного состава на путь можно представить как систему вертикальных, горизонтальных поперечных и горизонтальных продольных сил, изменяющихся во времени. Величина этих динамических сил зависит не только от характеристик подвижного состава, но и во многом от характеристик пути. К этим характеристикам относятся, в частности, характеристики пространственного сопротивления креплений перемещениям рельсов.

Ранее была рассмотрена жесткость креплений КБ и КПП-5 при вертикальных и горизонтальных поперечных изгибах и кручении рельсов [1-3].

Установлено, что на жесткость при горизонтальном поперечном изгибе и кручении рельса, кроме характеристик упругих элементов креплений, влияет величина вертикальной нагрузки на узел крепления. Анализу работы креплений КБ и КПП-5 при совместном действии на них вертикальных и горизонтальных продольных сил посвящена данная статья.

Основная часть. Продольные горизонтальные сопротивления креплений КБ. Рассмотрим работу узла крепления при совместном действии на него вертикальной и горизонтальной нагрузки от рельса. Продольные перемещения сечения рельса X , расположенного по оси симметрии крепления (по осям клеммных и закладных болтов), можно представить

как сумму перемещений за счет системы «подрельсовая прокладка – клеммы» (система 1) X_1 , и перемещений системы «нашпальная прокладка – закладные болты» (система 2) X_2

$$X = X_1 + X_2 . \quad (1)$$

И в 1 системе и в системе 2 есть элементы, которые работают упруго. Тогда, выражая продольные перемещения через горизонтальную реакцию крепления R_x и продольные жесткости систем C_{x1} и C_{x2} , получим

$$\frac{R_x}{C_x} = \frac{R_x}{C_{x1}} + \frac{R_x}{C_{x2}} . \quad (2)$$

После преобразований горизонтальная продольная жесткость узла крепления может быть определена как

$$C_x = \frac{C_{x1} \cdot C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} \quad (3)$$

где C_x – продольная жесткость всего узла крепления, кН/мм.

Рассмотрим составляющие сопротивления продольным перемещениям системы 1 (рис. 1). Условие равновесия сил системы 1

$$R_x = 2F_{mp} + Q_p^2 , \quad (4)$$

где F_{mp} – сила трения на контактах подошвы рельса и двух клемм, кН;

Q_p^z – упругое сопротивление подрельсовой прокладки при сдвиге, кН.

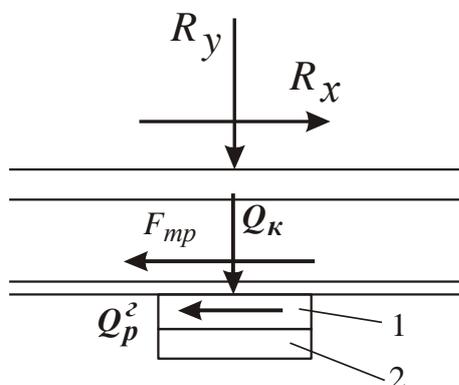


Рис. 1. Расчетная схема для определения продольных сопротивлений системы 1: 1 – подрельсовая прокладка; 2 – подкладка

Силу трения клеммы по подошве рельса при его горизонтальном перемещении нужно определять с учетом действия вертикальной нагрузки на узел скрепления R_y . При действии силы R_y происходит упругое сжатие подрельсовой прокладки и уменьшение за счет этого начального монтажного натяжения клеммных болтов. Тогда силу трения можно определить из выражения [1]

$$F_{mp} = \frac{1}{2} \left(Q_k^{нач} - R_y \frac{Ж_{ш}}{U_p^{дин} + \frac{Ж_{ш}}{2}} \right) \cdot f, \quad (5)$$

где $Q_k^{нач}$ – начальное монтажное натяжение клеммных болтов, кН;

$Ж_{ш}$ – жесткость пружинной шайбы, кН;

$U_p^{дин}$ – динамическая жесткость подрельсовой прокладки при сжатии, кН/мм [3];

f – коэффициент трения клемм по подошве рельса (сталь–сталь).

Начальное монтажное натяжение клеммных болтов [4]

$$Q_k^{нач} = M_{мон} \cdot \kappa,$$

где $M_{мон}$ – момент закручивания гаек клеммных болтов при монтаже скрепления ($M_{мон} = 150$ Нм);

κ – коэффициент перехода от момента закручивания гайки к силе натяжения клеммного болта ($\kappa = 136,5 \frac{1}{м}$ [4]).

Силу упругого сопротивления подрельсовой прокладки сдвигу при продольных перемещениях рельса (формула (4)) можно представить

$$Q_p^z = U_p^z \cdot X_1,$$

где U_p^z – горизонтальная жесткость подрельсовой прокладки при сдвиге, кН/мм.

Выполненными экспериментальными исследованиями установлено [3], что параметр U_p^z зависит от величины сжатия прокладки вертикальными силами клеммного нажатия и вертикальными динамическими силами, действующими на узел скрепления. В общем виде, с учетом всех влияющих факторов, горизонтальная жесткость подрельсовой прокладки при сдвиге определяется как [1]

$$U_p^z = \alpha_1 \left(\frac{M_{мон}}{\kappa \cdot U_p^{cm}} + \frac{R_y}{U_p^{дин} + \frac{Ж_{ш}}{2}} \right)^{\beta_1}, \quad (6)$$

где U_p^{cm} – вертикальная жесткость под-
рельсовой прокладки при статистическом
загружении [3], кН/мм;

α_1 и β_1 – эмпирические коэффициенты.

Остальные обозначения в формуле (6)
прежние.

Переходя к формуле (4) от сил
сопротивления продольным перемещениям
к функциям упругих и неупругих
(фрикционных) характеристик элементов
первой системы $C_{x1} = \frac{R_x}{x_1}$, окончательно
получим

$$C_{x1} = \frac{2F_{mp}}{x} + U_p^2. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое представляет
собой фрикционную составляющую. Вели-
чина U_p^2 определяется выражением (6).

Сопротивление системы 2
«нашпальная прокладка – закладные
болты» продольным перемещениям рельса
можно определить как

$$R_x = Q_{ш}^2 + 2Q_3, \quad (8)$$

$$U_{ш}^2 = \alpha_2 \left(\frac{2M_{мон}}{\kappa U_{ш}^{cm}} + \frac{R_y}{U_{ш}^{дин} + 2\mathcal{J}_{ш}} \right)^{\beta_2}, \quad (10)$$

где $M_{мон}$ – монтажное натяжение заклад-
ных болтов (120 Н·м);

$U_{ш}^{cm}$ и $U_{ш}^{дин}$ – статистическая и
динамическая жесткости нашпальной
прокладки при сжатии, кН/мм, [3];

α_2 и β_2 – эмпирические коэффициенты.

Остальные обозначения в формуле
(10) прежние.

$$D_3 = \alpha_3 \left(M_{мон} - \frac{R_y}{\kappa(U_{ш}^{дин} + 2\mathcal{J}_{ш})} \right)^{\beta_3}. \quad (11)$$

где $Q_{ш}^2$ – упругое сопротивление нашпаль-
ной прокладки при сдвиге, кН [3];

Q_3 – упругое сопротивление закладно-
го болта продольным перемещениям
подкладки, кН.

Переходя от упругих сил к функциям
жесткостей упругих элементов, учитывая,
что

$$R_x = C_{x2} \cdot X_2; \quad Q_{ш}^2 = U_{ш}^2 \cdot X_2;$$

$$Q_3 = D_3 \cdot X_2,$$

получим

$$C_{x2} = U_{ш}^2 + 2D_3, \quad (9)$$

где $U_{ш}^2$ – горизонтальная жесткость
нашпальной прокладки при сдвиге, кН/мм;

D_3 – жесткость закладного болта при
сдвиге подкладки, кН/мм.

Горизонтальная жесткость
нашпальной прокладки при сдвиге
определена экспериментально [3] как
функция величины ее сжатия монтажным
натяжением закладных болтов и
вертикальными динамическими силами:

Жесткость закладных болтов при
сдвиге подкладки зависит [6] от момента
закручивания их гаек

$$D_3 = \alpha_3 M^{\beta_3}.$$

С учетом действия вертикальных сил
 R_y , величина D_3 при динамическом
загружении узла скрепления определится:

Здесь все обозначения прежние.

Или иначе

Продольные сопротивления перемещениям рельсов скрепления КПП–5. Проведенное авторами экспериментальное исследование упругих характеристик элементов промежуточных скреплений типа КПП–5, в том числе подрельсовых прокладок этого скрепления, не выявило, в отличие от прокладок скрепления типа КБ, их упругости при сдвиге [5]. Этот факт можно объяснить характеристиками полиуретана, из которого они изготовлены.

Следовательно, силы сопротивления продольным перемещениям рельса будут представлять собой силу трения изолирующего вкладыша по верхней грани подошвы рельса и силу трения подошвы рельса по подрельсовой прокладке

$$R_x = 2F_{mp}^k + F_{mp}^{np} . \quad (12)$$

$$Q_{кл}^{\partial ин} = \frac{1}{2} y_{np}^m U_{np}^{cm} - \Delta y J_{кл} ; Q_{np}^{\partial ин} = y_{np}^m U_{np}^{cm} + \Delta y U_{np}^{\partial ин} , \quad (14)$$

где U_{np}^{cm} , $U_{np}^{\partial ин}$ – статистическая и динамическая жесткость подрельсовых прокладок при сжатии, кН/мм;

$J_{ш}$ – жесткость упругой клеммы, кН/мм;

y_{np}^m – величина сжатия прокладки при монтаже узла скрепления, мм;

$$R_x = 2f_m Q_{кл}^{\partial ин} + f_n \cdot Q_n^{\partial ин} , \quad (13)$$

где f_m и f_n – коэффициенты трения изолирующего вкладыша по подошве рельса (капролактан – сталь) и подошва по прокладке (сталь – полиуретан);

$Q_{кл}^{\partial ин}$ – сила клеммного прижатия при действии на узел скрепления вертикальной нагрузки R_y , кН;

$Q_{np}^{\partial ин}$ – сила сопротивления прокладки совместному сжатию двумя клеммами и вертикальной нагрузкой R_y (кН).

Величины $Q_{кл}^{\partial ин}$ и $Q_{np}^{\partial ин}$ получены в [2] как функции упругих характеристик элементов скрепления и их вертикальных деформаций:

Δy – вертикальные упругие деформации при нагрузках R_y , мм.

Тогда продольную силу сопротивления перемещениям R_x можно определить как

$$R_x = f_m y_{np}^m U_{np}^{cm} - 2f_m \Delta y J_{кл} + f_{np} y_{np}^m U_{np}^{cm} + f_{np} \Delta y U_{np}^{\partial ин} .$$

После преобразований получим:

$$R_x = y_{np}^m U_{np}^{cm} (f_m + f_{np}) + \Delta y (f_{np} U_{np}^{\partial ин} - 2f_m J_{кл}) . \quad (15)$$

Кроме сопротивлений продольным перемещениям, промежуточные скрепления создают в продольной

плоскости реактивные моменты сопротивлений поворотам сечений рельсов.

Жесткость при кручении скрепления КБ. При скреплении КБ угол поворота сечения рельса φ , расположенного по осям клеммных и закладных болтов (рис.2), будет складываться из угла поворота за

счет неравномерного сжатия подрельсовой прокладки φ_1 и неравномерного сжатия нащпальной прокладки φ_2 , рад,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2.$$

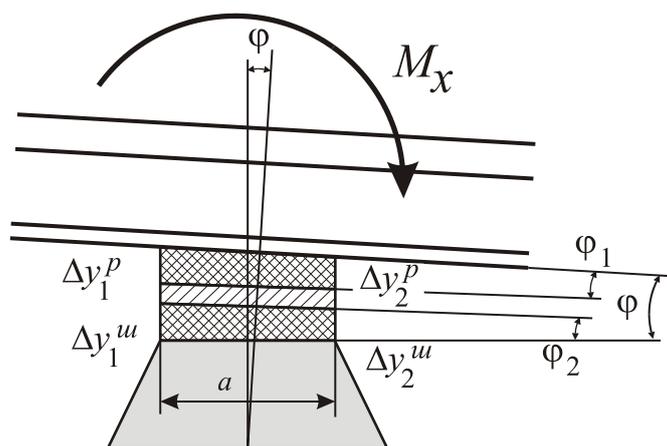


Рис. 2. Расчетная схема для определения угла поворота сечения рельса

Учитывая малые значения углов, можно определить

$$\varphi_1 = \frac{\Delta y_1^p - \Delta y_2^p}{a}; \quad \varphi_2 = \frac{\Delta y_1^ш - \Delta y_2^ш}{a}, \quad (16)$$

где $\Delta y_1^p, \Delta y_2^p$ – дополнительные деформации подрельсовой прокладки, вызванные поворотом сечения рельса, мм;

$\Delta y_1^ш, \Delta y_2^ш$ – то же нащпальной прокладки, мм;

a – ширина прокладки, мм.

Момент сопротивления M_{x1} повороту сечения рельса в продольной плоскости, возникающий при неравномерной деформации подрельсовой прокладки, можно определить рассмотрев равновесие моментов сил относительно центра поворота сечения (точка А) (рис. 3).

Поскольку сила клеммного нажатия $Q_{кл}^{дин}$

действует в этой точке, ее влияние не учитывается.

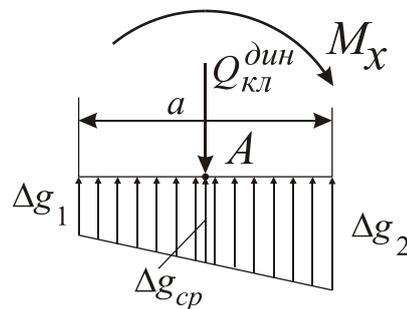


Рис. 3. Расчетная схема для определения моментов сопротивления M_x

$$M_x = \frac{\Delta g_1 + \Delta g_{cp}}{2} \cdot \frac{a^2}{8} - \frac{\Delta g_{cp} + \Delta g_2}{2} \cdot \frac{a^2}{8}.$$

Или после преобразований:

$$M_x = (\Delta g_1 - \Delta g_2) \cdot \frac{a^2}{16}, \quad (17)$$

где Δg_1 и Δg_2 – интенсивность неравномерно распределенной реакции сопротивления подрельсовой прокладки при неравномерном ее сжатии, кН/мм.

Величины Δg_1 и Δg_2 , кН/мм, можно определить как функции вертикальных деформации и жесткости подрельсовой прокладки при динамическом нагружении:

$$\Delta g_1 = \Delta y_1 \cdot \frac{U_p^{дин}}{b_p}; \quad \Delta g_2 = \Delta y_2 \cdot \frac{U_p^{дин}}{b_p},$$

где b_p – ширина подошвы рельса, мм.

Подставляя эти выражения в формулу (17), получим

$$M_x = (\Delta y_1 - \Delta y_2) \frac{a^2 \cdot U_p^{дин}}{16 \cdot b_p}.$$

Учитывая, что параметры в правой части этой формулы являются упругими, можно определить жесткость подрельсовой прокладки при кручении в продольной плоскости, кН·м/рад,

$$C_{\varphi_1} = \frac{M_x}{\varphi_1}.$$

С учетом формулы (16) получим, кН·м/рад,

$$C_{\varphi_1} = U_p^{дин} \frac{a^3}{16b_p}. \quad (18)$$

Выполняя аналогичные расчетные действия, можно получить жесткость наспальной прокладки при кручении в продольной плоскости, кН·м/рад,

$$C_{\varphi_2} = U_{ш}^{дин} \frac{a^3}{16b_n}, \quad (19)$$

где b_n – длина подкладки скрепления КБ, мм.

Учитывая последовательные соединения упругих элементов в узле скрепления КБ, его общая жесткость при кручении в продольной плоскости определяется выражением, кН·м/рад.

$$C_{\varphi} = \frac{C_{\varphi_1} \cdot C_{\varphi_2}}{C_{\varphi_1} + C_{\varphi_2}}. \quad (20)$$

Жесткость при кручении скрепления КПП–5. Рассматривая подобную работу скрепления КПП–5, его жесткость при кручении в продольной плоскости можно получить как, кН·м/рад,

$$C_{\varphi} = U_p^{дин} \frac{a^3}{16b_p}. \quad (21)$$

Здесь все обозначения прежние.

Таким образом, получим аналитические выражения, позволяющие определить сопротивления скреплений КБ и КПП–5 перемещениям рельсов в продольной плоскости как функции упругих и фрикционных характеристик элементов этих скреплений. При этом установлено влияние на эти характеристики нагрузок от рельсов на узлы этих скреплений.

Список літератури

1. Даренський, О.М. Математична модель просторової жорсткості скріплення типу КБ [Текст] / О.М. Даренський // Зб. наук. праць – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 80. – С. 166-176.
2. Даренський, О.М. Просторова жорсткість проміжного скріплення типу КПП-5 [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2007. – Вип. 10. – С. 100-109.
3. Даренський, О.М. Експериментальне визначення пружних характеристик прокладок проміжного скріплення КБ [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг // Зб. наук. праць. – Харків : УкрДАЗТ, 2007. – Вип 87. – С. 172-178.
4. Шахунянц, Г.М. Работа болтов в скреплениях [Текст] / Г.М. Шахунянц, А.А. Кондратьев // Труды МИИТ. – М., 1973. – Вып. 362. – С. 102-108.
5. Даренський, О.М., Експериментальне визначення пружних характеристик елементів проміжного скріплення КПП-5 [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2008. – Вип. 13. – С. 139-143 .

Ключевые слова: промежуточные скрепления, вертикальные и горизонтальные продольные силы.

Аннотації

Виконано порівняльний аналітичний аналіз роботи проміжних скріплень типу КБ і КПП-5 під дією вертикальних і горизонтальних повздовжніх сил. Отримані розрахункові рівняння, які дозволяють визначити пружні та фрикційні опори цих скріплень дії повздовжніх сил.

Выполнен сравнительный аналитический анализ работы промежуточных скреплений типа КБ и КПП-5 под действием вертикальных и горизонтальных сил. Получены расчетные уравнения, позволяющие определить упругие и фрикционные сопротивления этих скреплений действию продольных сил.

A comparative analysis of the analytical work of intermediate type fasteners KB and KPP-5 under the influence of vertical and horizontal forces. The calculating equation for determining the elastic and frictional resistance to the action of these fasteners longitudinal forces.