
ЗАЛІЗНИЧНІ СПОРУДИ ТА КОЛІЙНЕ ГОСПОДАРСТВО

УДК 004.89

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.144.2014.80407>

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СКРЕПЛЕНИЙ КБ И КПП-5 ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ РЕЛЬСОВ В ПРОДОЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Д-р техн. наук А.Н. Даренский, магистрант ИППК Р.А. Дудник

ОПІР ПРОМІЖНИХ СКРІПЛЕНЬ КБ І КПП-5 ПЕРЕМІЩЕННЯМ РЕЙОК У ПОЗДОВЖНІЙ ПЛОЩИНІ

Д-р техн. наук О.М. Даренський, магістрант ІППК Р.О. Дудник

RESISTANCE INTERMEDIATE FASTENINGS KB AND KPP-5 MOVEMENT OF THE RAIL IN THE LONGITUDINAL PLANE

Doct. of techn. sciences A.N. Darenskiy, master student Training Institute R.A. Dudnik

Получены аналитические выражения, позволяющие определить сопротивления скреплений КБ и КПП-5 перемещениям рельсов в продольной плоскости.

Ключевые слова: рельсовые скрепления типа КПП-5, КБ, пространственная жесткость, сила трения на контактах подошвы рельса и двух клемм.

Отримані аналітичні вирази, які дають змогу визначити опір скріплення КБ та КПП-5 переміщенням рейок у поздовжній площині

Ключові слова: рейкові скріплення типу КПП-5, КБ, просторова жорсткість, сила тертя на контактах підшви рейки і двох клем.

The analytical expressions are received, allowing to define resistance of fastenings of KB KPP-5 to movings of rails to a longitudinal plane

Keywords: rail fastening type of check KPP-5, KB, horizontal bend, frictional force on the contacts of the rail foot and two terminals.

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 скреплений перемещениям рельсов.

Анализ исследований и публикаций по данной проблеме. В работе [1] предложена математическая модель жесткости скрепления типа КБ, при действиях на узел скрепления либо вертикальных, либо горизонтальных поперечных сил. Аналогичные модели были

разработаны для скреплений типа КПП-5. В работе [3,5] экспериментальными исследованиями определены жесткости прокладок, пружинных шайб и клемм для скрепления КБ. Однако в работе [5] отмечается, что на жесткость этих скреплений при горизонтальном поперечном изгибе и кручении рельсов влияет также величина вертикальной нагрузки. Работа скреплений при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил в этих работах не рассматривалась.

Постановка задач. Анализ работы скреплений типа КБ и КПП-5 при совместном действии вертикальных и горизонтальных продольных сил посвящена эта статья.

Основная часть. *Продольные горизонтальные сопротивления скреплений КБ.*

Рассмотрим работу узла скрепления при совместном действии на него вертикальной и горизонтальной нагрузки от рельса. Продольные перемещения сечения рельса X , расположенного по оси симметрии скрепления (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-й и во 2-й системах есть элементы, которые работают упруго. Тогда, выражая продольные перемещения через горизонтальную реакцию скрепления 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 скрепления 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 скрепления, кН/мм.

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

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

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

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

Силу трения клеммы по подошве рельса при его горизонтальном перемещении нужно определять с учетом действия вертикальной нагрузки на узел скрепления R_y .

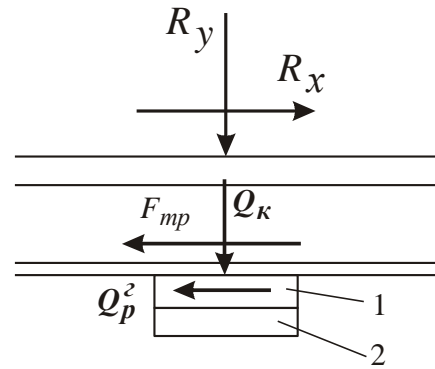


Рис. 1. Расчетная схема для определения продольных сопротивлений системы 1: 1 – подрельсовая прокладка; 2 – подкладка

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 так:

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

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]

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

где U_p^{cm} – вертикальная жесткость подрельсовой проклад­ки при статистическом нагружении [3], кН/мм;

α_1 и β_1 – эмпирические коэффициенты.

$$R_x = C_{x2} \cdot X_2; \quad Q_{ш}^z = U_{ш}^z \cdot X_2; \quad Q_3 = D_3 \cdot X_2,$$

получим

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

где $U_{ш}^z$ – 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

Остальные обозначения в формуле (6) прежние.

Переходя в формуле (4) от сил сопро­тив­ле­ния продольным перемеще­ниям к функциям упругих и неупругих (фрикционных) характеристик элементов первой системы

$$C_{x1} = \frac{R_x}{x_1}, \text{ окончательно получим}$$

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

Здесь первое слагаемое представляет собой фрикционную составляющую. Величина U_p^z определяется выражением (6).

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

$$R_x = Q_{ш}^z + 2Q_3, \quad (8)$$

где $Q_{ш}^z$ – упругое сопро­тив­ле­ние на­ш­паль­ной проклад­ки при сдвиге, кН [3];

Q_3 – упругое сопро­тив­ле­ние закладного болта продольным перемеще­нием подкладки, кН.

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

болтов и вертикальными динамическими силами:

$$U_{ш}^z = \alpha_2 \left(\frac{2M_{мон}}{\kappa U_{ш}^{cm}} + \frac{R_y}{U_{ш}^{\partial ин} + 2Ж_{ш}} \right)^{\beta_2}, \quad (10)$$

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

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

α_2 и β_2 – эмпирические коэффициенты.

Остальные обозначения в формуле (10) прежние.

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 нагружении узла скрепления определится по формуле

$$D_3 = \alpha_3 \left(M_{\text{монт}} - \frac{R_y}{\kappa(U_{\text{и}}^{\text{дин}} + 2J_{\text{и}})} \right)^{\beta_3}. \quad (11)$$

Здесь все обозначения прежние.

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 трения силы трения изолирующего вкладыша по верхней грани подошвы рельса и силу трения подошвы рельса по подрельсовой прокладке

$$R_x = 2F_{\text{тр}}^{\kappa} + F_{\text{тр}}^{\text{np}}. \quad (12)$$

Или иначе

$$Q_{\text{кл}}^{\text{дин}} = \frac{1}{2} y_{\text{np}}^{\text{м}} U_{\text{np}}^{\text{ст}} - \Delta y J_{\text{кл}}; \quad Q_{\text{np}}^{\text{дин}} = y_{\text{np}}^{\text{м}} U_{\text{np}}^{\text{ст}} + \Delta y U_{\text{np}}^{\text{дин}}, \quad (14)$$

где $U_{\text{np}}^{\text{ст}}$, $U_{\text{np}}^{\text{дин}}$ – статистическая и динамическая жесткость подрельсовых прокладок при сжатии, кН/мм;

$J_{\text{и}}$ – жесткость упругой клеммы (кН/мм);

$y_{\text{np}}^{\text{м}}$ – величина сжатия прокладки при монтаже узла скрепления, мм;

$$R_x = 2f_{\text{м}} Q_{\text{кл}}^{\text{дин}} + f_{\text{н}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{дин}}, \quad (13)$$

где $f_{\text{м}}$ и $f_{\text{н}}$ – коэффициенты трения изолирующего вкладыша по подошве рельса (капролактан – сталь) и подошва по прокладке (сталь – полиуретан);

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

$Q_{\text{np}}^{\text{дин}}$ – сила сопротивления прокладки совместному сжатию двумя клеммами и вертикальной нагрузкой R_y , кН.

Величины $Q_{\text{кл}}^{\text{дин}}$ и $Q_{\text{np}}^{\text{дин}}$ 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

$$R_x = f_{\text{м}} y_{\text{np}}^{\text{м}} U_{\text{np}}^{\text{ст}} - 2f_{\text{м}} \Delta y J_{\text{кл}} + f_{\text{н}} y_{\text{np}}^{\text{м}} U_{\text{np}}^{\text{ст}} + f_{\text{н}} \Delta y U_{\text{np}}^{\text{дин}}.$$

После преобразований получим

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

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 , рад, 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 напальной прокладки φ_2 :

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

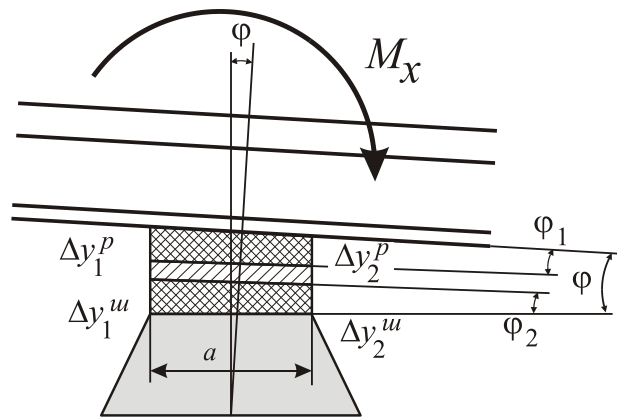


Рис. 2. Расчетная схема для определения угла поворота сечения рельса

Учитывая малые значения углов, можно определить:

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

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

$\Delta y_1^u, \Delta y_2^u$ – то же напальной 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

$Q_{кл}^{\partial_{ин}}$ действует в этой точке, ее влияние не учитывается.

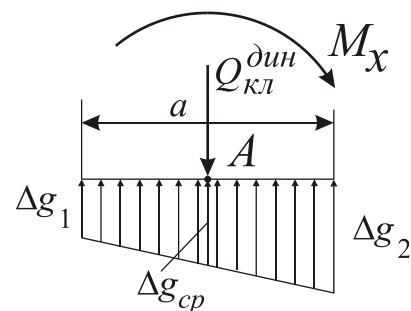


Рис. 3. Расчетная схема для определения моментов сопротивления M_x

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

Или после преобразований, кН/мм,

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

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

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

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

где ϵ_p – ширина подошвы рельса, мм.

Подставляя эти выражения в формулу (17), получим

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

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

$$C_{\phi_1} = \frac{M_x}{\phi_1}.$$

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

$$C_{\phi_1} = U_p^{\text{дин}} \frac{a^3}{16 \epsilon_p}. \quad (18)$$

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

$$C_{\phi_2} = U_{\text{ш}}^{\text{дин}} \frac{a^3}{16 \epsilon_n}, \quad (19)$$

где ϵ_n – длина подкладки скрепления КБ, мм.

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

$$C_{\phi} = \frac{C_{\phi_1} \cdot C_{\phi_2}}{C_{\phi_1} + C_{\phi_2}}. \quad (20)$$

Жесткость при кручении скрепления КПП-5

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

$$C_{\phi} = U_p^{\text{дин}} \frac{a^3}{16 \epsilon_p}. \quad (21)$$

Здесь все обозначения прежние.

Вывод из изыскания и перспективы, дальнейшие развития в данном направлении

Таким образом, получим аналитические выражения, позволяющие определить сопротивление 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 использованных источников

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. Витольберг // 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. Витольберг // 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. Контратьев // Труды МИИТ. – М.: МИИТ, 1973. – Вып. 362. – С. 34-45.
5. Даренський О.М., Експериментальне визначення пружних характеристик елементів проміжного скріплення КПП-5 [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Витольберг // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2008. – Вип. 13. – С. 139-143.
6. Даренский А.Н. Результаты лабораторных испытаний скрепления типа КБ [Текст] / А.Н. Даренский. – Харьков: ХИИТ, 1983. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 18.03.83 г., №2145.

Даренський Олександр Миколайович, д-р техн. наук., професор кафедри колії та колійного господарства Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 723-12-34.
Дудник Роман Олександрович, магістрант ІППК. Тел: (050) 7683686

Darensky Oleksandr Mykolajovych, Ph.D., Professor of the Department "road and track facilities" Ukraine State of Railway Transport. Tel.:(057) 723-12-34.
Dudnik Roman A., Master Training Institute. Tel: (050) 7683686