

БУДІВНИЦТВО, РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ
КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

УДК 625.142.03

Даренский О.Н., к.т.н., профессор УкрГАЗТ)
Витольберг В.Г., ассистент (УкрГАЗТ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ
СКРЕПЛЕНИЙ КБ И КПП-5 ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ РЕЛЬСОВ В
ПРОДОЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Сопротивление узлов креплений перемещениям рельсов в продольно плоскости является одной из основных характеристик, влияющих на деформации и силы взаимодействия пути и подвижного состава.

Основными рабочими характеристиками узлов креплений в продольной плоскости являются те, которые определяют их способность деформироваться под воздействием нагрузки. К ним относятся упругая характеристика и жесткость. Упругой характеристикой называют зависимость между перемещениями x и нагрузкой R_x . Эта характеристика может быть линейной и нелинейной, возрастающей (мягкой) или затухающей (жесткой) (рисунок 1).

Если характеристика узла крепления линейна, то его жесткость можно определить как отношение нагрузки к соответствующему перемещению:

$$C_x = \frac{R_x}{x}. \quad (1)$$

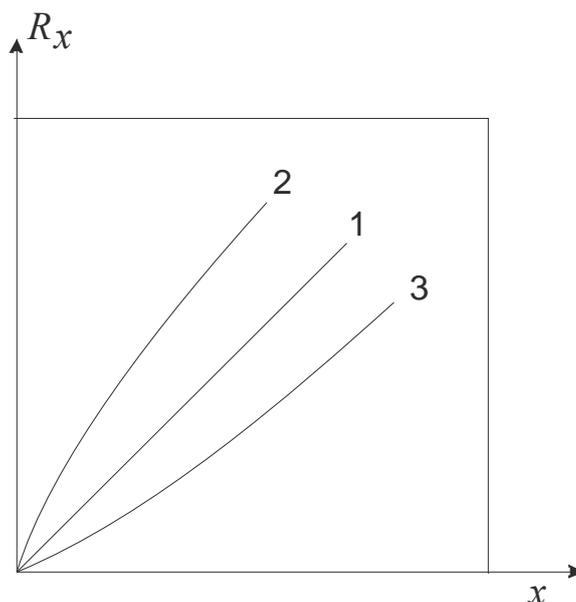


Рисунок 1 – Види еластичних характеристик:

1 – лінійна; 2 – зростаюча (м'яка); 3 – згасаюча (жорстка)

Жорсткість скріплення з нелінійною характеристикою змінюється в залежності від переміщення і в загальному випадку може бути визначена так:

$$C_x = \frac{dR_x}{dx}. \quad (2)$$

В практичних розрахунках [1] прийнято вважати жорсткість скріплень величиною постійною, замінюючи м'яку або жорстку характеристику лінійною характеристикою на робочому ділянці методом хорд або методом дотичних (рисунок 2).

При цьому важливо правильно вибрати робочий ділянку, так як жорсткість скріплень, отримані цими методами, можна використовувати тільки в межах тих амплітуд, для яких вироблена лінеаризація.

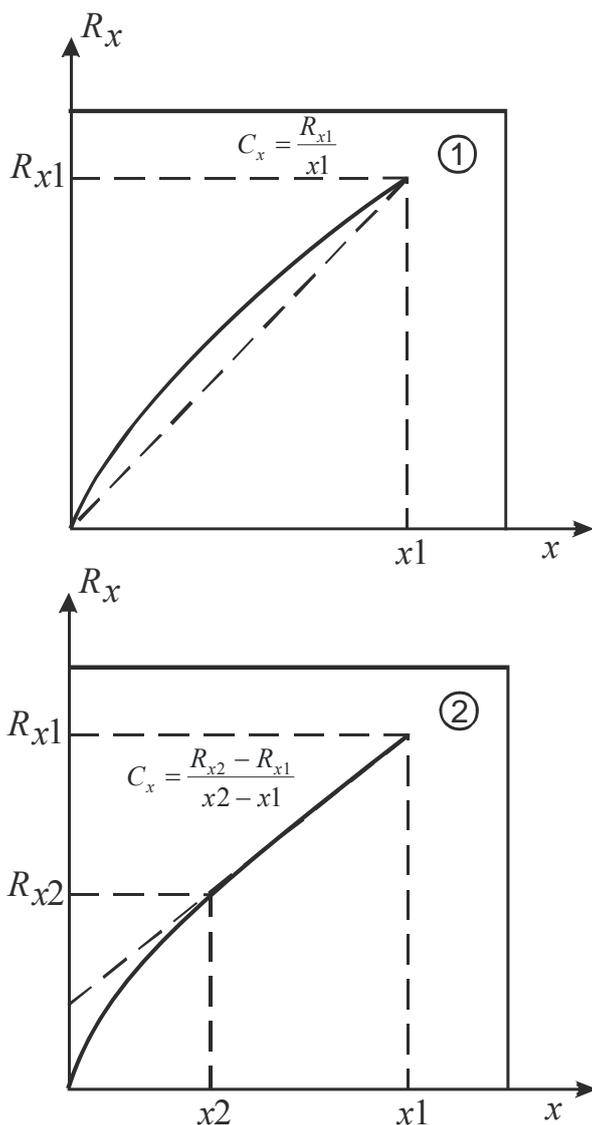


Рисунок 2 – Линеаризация зависимости $R_x = f(x)$:

1 – метод хорд; 2 – метод касательных

Ранее [2] была рассмотрена работа промежуточных скреплений КБ и КПП–5 при совместном действии на них вертикальных и горизонтальных продольных сил и получены математические выражения, позволяющие определять упругие и фрикционные сопротивления этих скреплений продольным перемещением рельсов.

Для проверки предложенной методики и уточнения диссипационных характеристик скреплений КБ и КПП–5 были, проведены экспериментальные работы в лабораторных условиях, при этом был

принят темплетный способ оценки. При выполнении работ использовалась установка, общий вид которой приведен на рисунке 3 отрезок рельса типа Р65 длиной 600 мм прикреплялся к железобетонной шпале элементами скреплений. Свободный конец рельса со стороны домкрата поддерживался шарнирной опорой для точной центровки домкрата. Горизонтальные нагрузки создавались гидравлическими домкратами ДГ-5 ступенями 500, 1250, 2500 Н и далее с градацией 1000 Н до уровня 9-10 кН, что является максимальной нагрузкой на узел скрепления в реальных условиях [3, 4]. Нагрузки контролировались динамометром ДОСМ-3. При каждой ступени нагрузки фиксировались перемещения рельса, а при скреплении КБ – и перемещения подкладки относительно шпалы. Перемещения определялись с помощью индикаторов ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм. После достижения максимальной величины нагрузка снималась и фиксировались остаточные перемещения рельсов.

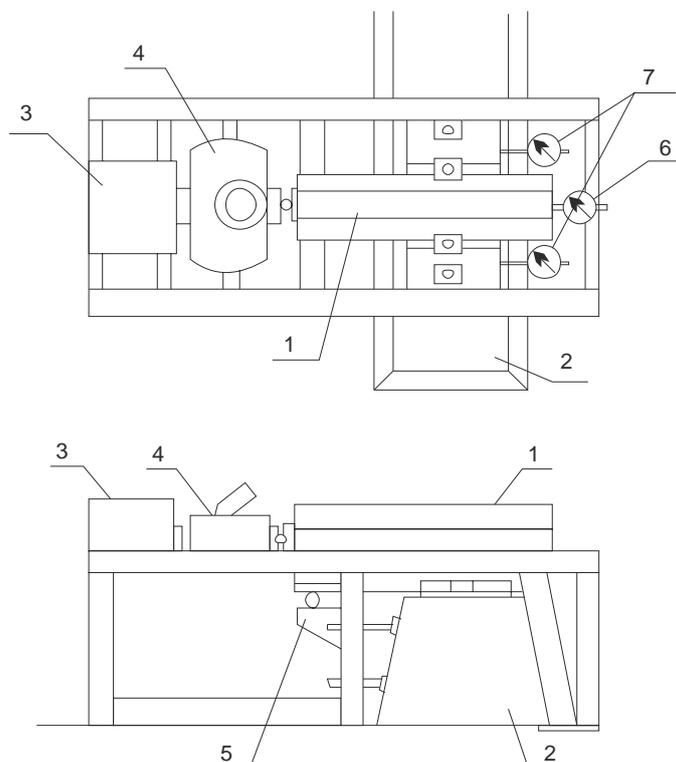


Рисунок 3 – Схема установки для испытаний скреплений:
1 – рельс; 2 – шпала; 3 – домкрат; 5 – динамометр; 6 – шарнирная опора; 7 – индикатор перемещений рельса; 8 – индикаторы перемещений подкладки

Чтобы избежать случайной ошибки, в каждом опыте после обжатия конструкции с условием 500 Н, цикл загрузки повторялся не менее трех раз.

Всего было проведено три серии опытов:

Серия 1 – шпала Ш-1, скрепление КБ нашпальные прокладки ЦП-163, подрельсовая ЦП-143;

Серия 2 – та же шпала и скрепление, нашпальные прокладки ЦП-153, подрельсовая ЦП-260;

Серия 3 – шпала С-3-0, скрепление КПП-5.

В каждой серии было испытано не менее 17 прокладок каждого типа. Достаточность количества опытов определялась методами математической статистики.

При скреплении КБ натяжения клеммных и закладных болтов производилось ступенчато 50-100-150 мм.

По результатам опытов были построены графики зависимостей $R_x = f(x)$, для скрепления КБ – при разных подрельсовых и нашпальных прокладках и разном уровне натяжения клеммных и закладных болтов. Графики зависимостей, которые построены для среднеарифметических значений опытов, приведены на рисунках 4, 5, 6.

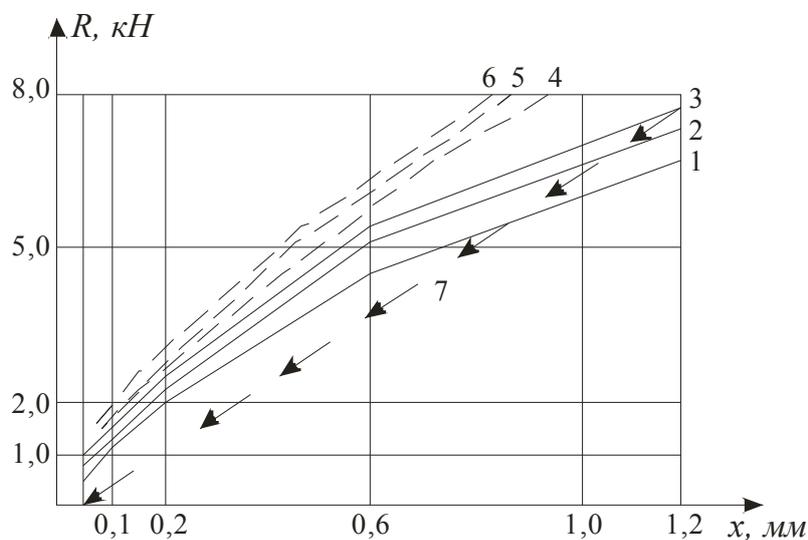


Рисунок 4 – Упругие характеристики скрепления КБ при прокладках ЦП-143 и ЦП-163, перемещения:

1 – рельса, $M = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$; 2 – рельса, $M = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$; 3 – рельса, $M = 150 \text{ Н}\cdot\text{м}$; 4 – прокладки, $M = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$; 5 – подкладки $M = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$; 6 – подкладки, $M = 150 \text{ Н}\cdot\text{м}$; 7 – рельса при снятии нагрузки, $M = 150 \text{ Н}\cdot\text{м}$

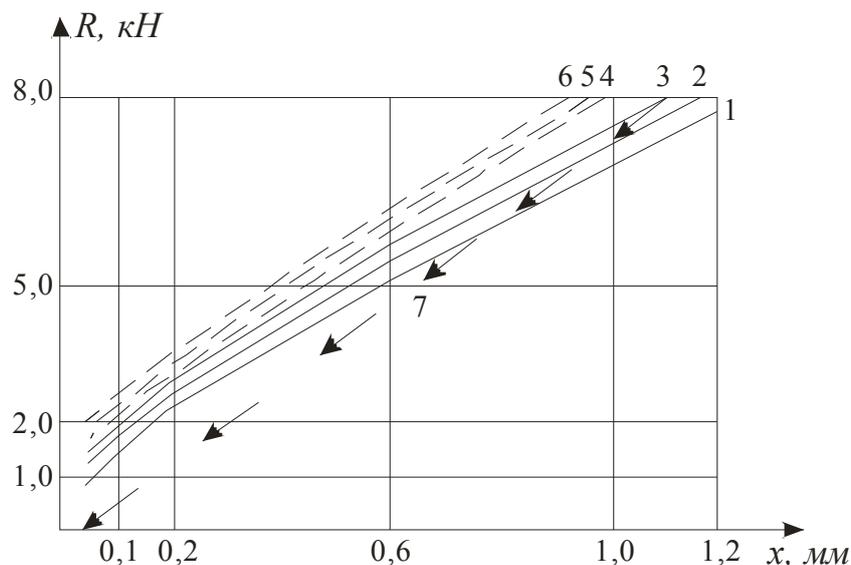


Рисунок 5 – Упругие характеристики скрепления КБ при прокладках ЦП-200 и ЦП-153, перемещения:

1 – рельса, $M = 50$ Н·м; 2 – рельса, $M = 100$ Н·м; 3 – рельса, $M = 150$ Н·м; 4 – прокладки, $M = 50$ Н·м; 5 – подкладки $M = 100$ Н·м; 6 – подкладки, $M = 150$ Н·м; 7 – рельса при снятии нарузки, $M = 150$ Н·м

Для скреплений КБ (рисунок 4, 5) приведены графики $R_x = f(x)$ как для перемещений рельсов (кривые 1,2,3) так и для перемещений подкладок (кривые 4,5,6). На рисунках показаны также графики перемещений рельсов при снятии нарузки, которые представлены прямыми 7 на рисунках 4, 5 (при натяжении болтов 150 Н·м) и на рисунке 6. Среднее остаточные перемещения рельса после снятия нарузки составляют для скрепления КБ 0,05 мм (прокладки ЦП 163 и ЦПМЗ) и 0,07 мм (прокладки ЦП 153 и ЦП260), для скрепления КПП-5-0,3 мм.

Графики зависимостей $R_x = f(x)$ имеют мягкую характеристику и для перемещений рельсов аппроксимированы степенной функцией вида $R_x = ax^b$. Параметры a и b были определены методом наименьших квадратов. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Для оценки адекватности расчетных значений теоретической кривой относительно опытных данных были рассчитаны средние ошибки аппроксимации:

$$\varepsilon = \frac{100}{N} \sum_1^N \left(\frac{\hat{R}_i - R_i}{R_i} \right), \quad (\%) \quad (3)$$

где \hat{R}_i – расчетные значения переменной;

R_i – её опытные значение;

N – количество расчетных точек.

Таблица 1 – Аналитическая зависимость упругих характеристик скреплений

Тип скрепления	Тип прокладок подрельсов нашпальн	Крутящий момент натяжения болтов Н·м	Зависимость упругой характеристики	Средняя ошибка аппроксимации
КБ	$\frac{ЦП143}{ЦП63}$	50	$R_x = 6.86 \cdot 10^3 x^{0.78}$	5,17
		100	$R_x = 7.44 \cdot 10^3 x^{0.75}$	4,71
		150	$R_x = 7.81 \cdot 10^3 x^{0.71}$	2,84
	$\frac{ЦП260}{ЦП153}$	50	$R_x = 7.61 \cdot 10^3 x^{0.73}$	4,64
		100	$R_x = 8.05 \cdot 10^3 x^{0.67}$	3,19
		150	$R_x = 8.31 \cdot 10^3 x^{0.63}$	3,33
КПП-5	$\frac{ПРП - 2.1}{-}$	-	$R_x = 14.5 \cdot 10^3 x^{0.274}$	9,33

Расчеты показали (таблица 1) достаточно хорошую сходимость результатов.

Сравнительный анализ упругих характеристик скрепления КБ (кривые 1,2,3, рисунки 4,5) и скрепления КПП – 5 (кривая 1, рисунок 6) показывают, что продольная связь рельсов с опорами при скреплении КБ носит упруго – фрикционный, а при скреплении КПП 5 в основном фрикционный характер, что подтверждает сделанный на основании теоретических предположений вывод [2].

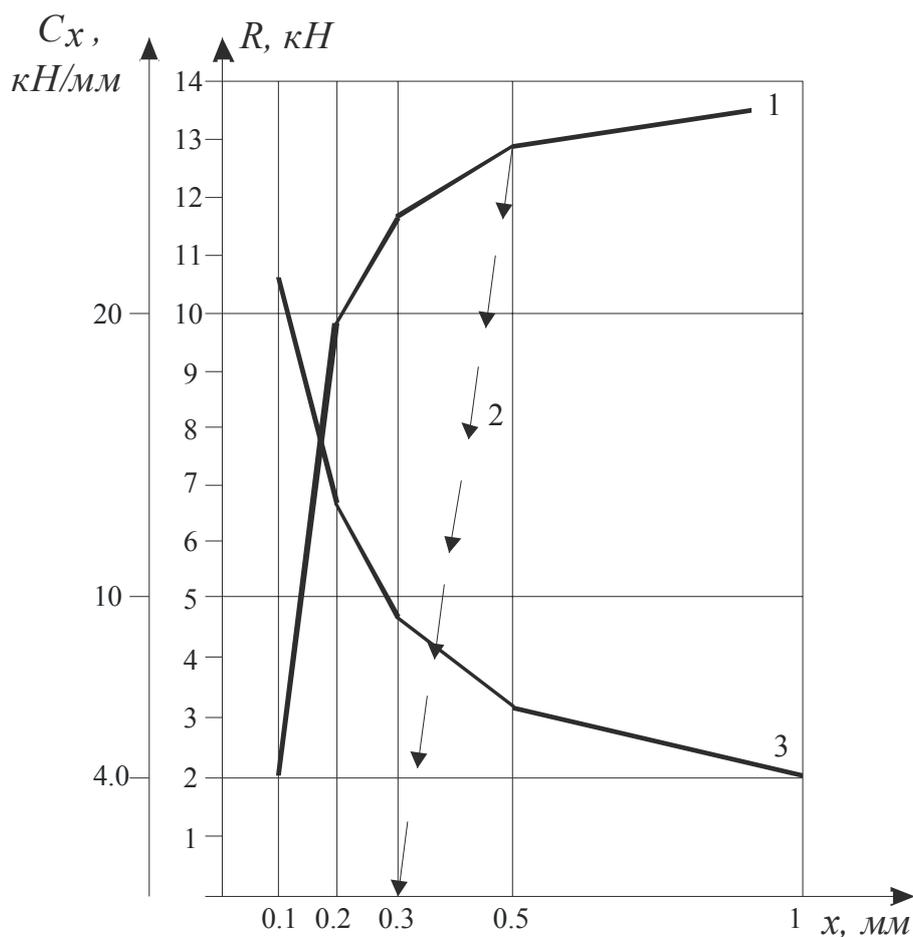


Рисунок 6 – Характеристика скрепления КПП-5:

1 – упругая характеристика; 2 – перемещения рельсов при снятии нагрузки; 3 – жесткость узла скрепления

Упругие характеристики скреплений $R_x = f(x)$ не линейны и, следовательно, жесткости узлов скреплений зависят от величины перемещений. Используя общую формулу (2) для определения зависимости жесткости узлов скреплений c_x от величины перемещений рельсов x и принятый вид аналитического выражения упругой характеристики $R_x = ax^b$, можно определить:

$$C_x = \frac{dR_x}{dx} = abx^{(b-1)} \quad (4)$$

БУДІВНИЦТВО, РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Полученные таким образом зависимости продольной жесткости узлов скреплений КБ и КПП–5 от величины перемещений рельсов приведены в таблице 2 и графически на рисунке 7 и 8 (для КБ) и рисунке 6, кривая 3 (для КПП–5).

Таблица 2 – Продольные жесткости скреплений КБ и КПП – 5

Тип скрепления	Тип прокладок порельсов нащп.	K_p момент натяжения болтов $M(N \cdot m)$	Зависимость продольной жесткости скреплений C_x	Расчетные значения $C_{хаасч}$ (кН/мм)	Расчетные значения C_x (кН/мм)	Доля системы C_{x2} μ
КБ	$\frac{ЦП143}{ЦП63}$	50	$5,35 \cdot 10^3 x^{-0.22}$	6910	7600	0,71
		100	$5,58 \cdot 10^3 x^{-0.25}$	7710	8150	0,74
		150	$5,54 \cdot 10^3 x^{-0.29}$	8271	9200	0,79
	$\frac{ЦП260}{ЦП153}$	50	$5,55 \cdot 10^3 x^{-0.27}$	7960	7300	0,76
		100	$5,39 \cdot 10^3 x^{-0.33}$	8812	8350	0,80
		150	$5,23 \cdot 10^3 x^{-0.37}$	9380	8900	0,83
КПП - 5	$\frac{ПРП - 2.1}{-}$	-	$3,97 \cdot 10^3 x^{-0.726}$	9514	-	-

В практических расчетах пути [1] и большинстве научных исследований [3,4,5] горизонтальные продольные жесткости скреплений C_x приняты постоянные и упругие характеристики линейными.

Анализируя графики на рисунках 4-8 и учитывая тот факт, что упругие характеристики скреплений КБ носят упруго – фрикционный, а характеристики скреплений КПП - 5 в основном фрикционный характер, можно предположить, что для скрепления КБ обоснованным будет применение метода хорд для линеаризации упругих характеристик и определения продольной жесткости узла скрепления, а для скрепления КБ - метода касательных.

При линеаризации методом хорд для скрепления КБ жесткость C_x определялись по величине приращения продольной нагрузки R_x , к соответствующей деформации x_1 (рисунок 2а). Рабочий участок выбирался из условия средней статистической нагрузки на узел скрепления в реальных условиях, которая по данным [3] составляет 6700Н.

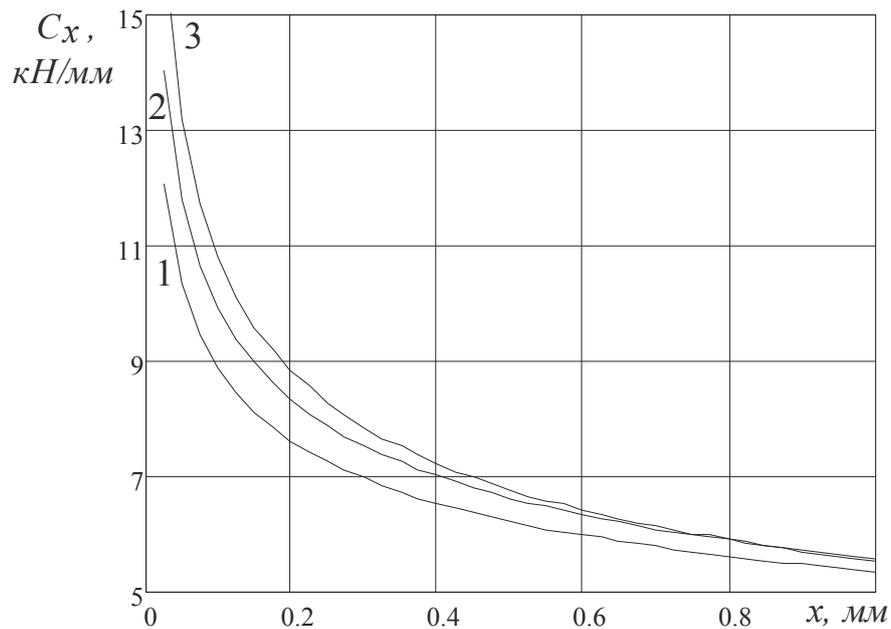


Рисунок 7 – Зависимости продольной жесткости C_x скрепления КБ от перемещений рельсов при прокладках ЦП 143 и ЦП 163:
1 – при натяжении болтов 50 Н·м; 2 – при 100 Н·м; 3 – при 150 Н·м

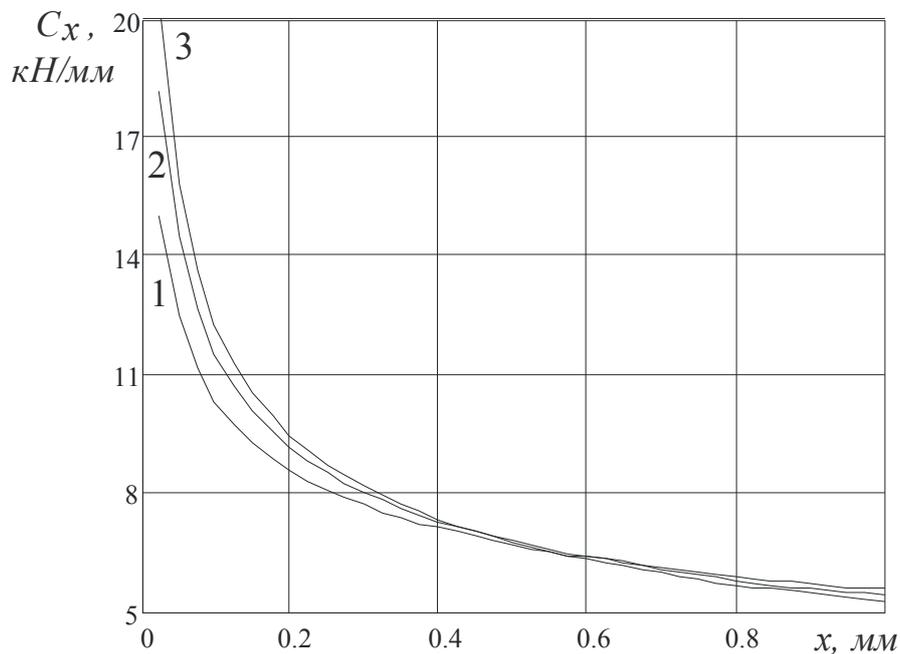


Рисунок 8 – Зависимости продольной жесткости C_x скрепления КБ от перемещений рельсов при прокладках ЦП 260 и ЦП 153:
1 – при натяжении болтов 50 Н·м; 2 – при 100 Н·м; 3 – при 150 Н·м

При линеаризации методом касательной была использована формула (4), при этом в качестве расчетного значения X принята величина 0,3мм из условия реальных перемещений подошвы рельса по данным, приведенным в [4].

Полученные расчетные значения продольной жесткости креплений $C_{x_{расч}}$ приведены в таблице 2. Следует отметить хорошую сходимость результатов опытов с данными, которые получены на основании теоретических расчетов по методике, изложенной в [2] для креплений незагруженных вертикальной нагрузкой от подвижного состава. Различие опытных и теоретических значений C_x для креплений КБ не превышает 10 %.

Данные о перемещениях прокладок крепления КБ при продольных нагрузках на узел крепления (кривые 4,5,6 на рисунках 4 и 5) позволили уточнить долю жесткости системы C_{x_2} «нашпальные прокладки – закладные болты» [2] в формировании общей продольной жесткости узла крепления. Количественная оценка доли влияния системы C_{x_2} на общую жесткость определить как:

$$\mu = 1 - \frac{C_x}{C_{x_2}} . \quad (5)$$

Величина C_{x_2} определялась по приведенной выше методике в расчетном интервале нагрузок 0-6700м. Результаты расчета приведены в таблице 2. Данные показывают, что доля жесткости C_{x_1} «подрельсовая прокладка – клеммы» и [2] не превышает 30% и уменьшается с увеличением натяжения болтов.

По приведенным в таблице 2 соотношениям между величинами крутящего момента натяжения гаек клеммных и закладных болтов и значениями опытных данных продольной жесткости креплений КБ $C_{x_{расч}}$ построены графики зависимостей $C_{x_{расч}} = f(M)$ (рисунок 9).

Эти зависимости были аппроксимированы с использованием выражения вида:

$$C_{x_{расч}} = aM^6 .$$

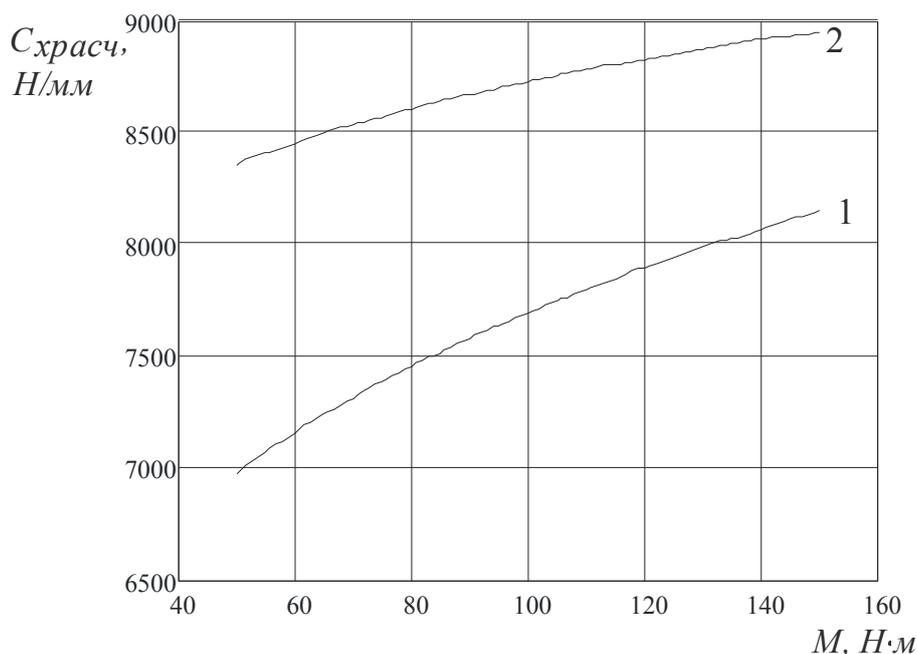


Рисунок 9 – Залежності продольної жорсткості скреплень КБ від величини крутячого моменту натяження болтів:
1 – при прокладках ЦП 143 і ЦП 163; 2 – при прокладках ЦП 260 і ЦП 153

Ети залежності a і b визначені, в якості першого наближення, тільки для трьох точок, методом найменших квадратів:

- при прокладках ЦП 143 і ЦП 163

$$C_{хррасч} = 4.0 \cdot 10^3 M^{0,142} \quad (6)$$

- при прокладках ЦП 260 і ЦП 153

$$C_{хррасч} = 6,53 \cdot 10^3 M^{0,063} \quad (7)$$

Аналіз графіків (рисунок 9) і аналітичні вирази (6) і (7) показує, що з збільшенням натяження клеммних і закладних болтів продольна жорсткість скреплення C_x зростає, причому більш інтенсивно при більш м'яких прокладках ЦП – 143 і ЦП – 163.

Выводы:

1. Зависимости между продольными силами и перемещениями рельсов при скреплениях КБ и КПП – не линейны и имеют «мягкую» характеристику.

2. Продольная связь рельсов с опорами при скреплении КБ носит упруго-фрикционный, а при скреплении КПП–5 – в основном фрикционный характер.

3. Для линеаризации упругих характеристик скрепления КБ предпочтительным является метод хорд, принимая в качестве рабочего диапазона среднестатистические нагрузки на узел скрепления. Для линеаризации упругих характеристик скрепления КПП–5 нужно использовать, учитывая диапазон изменений продольной жесткости (рисунок 6, кривая 3), метод касательных. При этом в качестве рабочего диапазона применять реальные перемещения подошвы рельса в пути.

4. Полученные опытные данные о значениях продольной жесткости скрепления КБ имеют хорошую сходимость с результатами, которые получены на основании теоретических расчетов [2].

5. На формирование продольной жесткости скрепления КБ оказывалось, в основном, влияние системы «нашпальная прокладка - закладные болты». Этот факт можно объяснить тем, что работа системы «подрельсовая прокладки – клеммы» носит фрикционно–упругий характер [2].

6. С увеличением натяжения клеммных и закладных болтов продольная жесткость скреплений КБ возрастает более интенсивно при сравнительно мягких прокладках ЦП – 143 и ЦП – 163.

Список литературы

1. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість/ Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін. – К: Транспорт України, 2006. – С.168.

2. Даренський А.Н., Витольберг В.Г. Сопротивление промежуточных скреплений КБ и КПП -5 перемещениям рельсов в продольной плоскости // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2008. – Вип. 14. – С. ___.

3. Меншикова В.И. Динамические продольные силы и перемещения рельсов железнодорожного пути // Труды ЦНИИ МПСМ, М.: Транспорт, 1972. – Вып.406.

4. Иванова Л.И., Карпущенко М.И. Экспериментальные исследования перемещений элементов рельсошпальной решетки под поездной нагрузкой // Труды НИИЖТ, Новосибирск, 1971. – Вып. 129. – С. 61-67.

5. Альбрехт В.Г., Коган А.Я. Угон железнодорожного пути и борьба с ним. М.: Транспорт, 1996. – 160 с.