

*В. В. Ковальов, к. т. н.*

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна*

**Ключові слова:** модуль пружності, вертикальна жорсткість колії, розрахунок колії на міцність.

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Однією з основних характеристик колії, що описує особливості її взаємодії з рухомим складом, є модуль пружності підрейкової основи. Ця характеристика є однією з найважливіших початкових величин при виконанні розрахунків колії на міцність для встановлення умов руху потягів по колії різних конструкцій. В зв'язку з стратегією Укрзалізниці на підвищення швидкості руху пасажирських потягів та збільшення обсягів перевезень вантажними поїздами актуальним є дослідження впливу потягів на колію, з проведенням розрахунків на міцність та практичним визначенням достовірних значень модуля пружності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для отримання вертикального модуля пружності колії по його жорсткості і коефіцієнта тертя основи колії за пропозицією М.Ф. Веріго [1] можна використовувати петлю гістерезису, отриману при статичному завантаженні колії вертикальним навантаженням. Для цього тиск на рейку створювався домкратом, що упирається в рейку і підвагонну балку, а величина вертикальних прогинів фіксувалася механічними прогиномірами. Навантаження і розвантаження рейки проводилося ступенями через 2 т в інтервалі від 0 до 8 т. В результаті обробки даних виходили діаграми (петлі гістерезису) залежності прогинання рейки від величини тиску на нього в процесі навантаження і розвантаження. Запропонована ним методика вимірювань достатньо трудомістка.

Не дивлячись на це по запропонованій методиці виконувалися дослідження жорсткості шляху МПТом [2], ВНІЗТом, ЛІЗТом [3], а декілька пізніше і НІЗТом [4].

У ДІТі для отримання вказаних характеристик колії було розроблено спеціальний гідравлічний пристрій навантаження, змонтований на базі чотирирівнісного вагону. При цьому сили, що діють на рейку, вимірювалися за допомогою встановлених в головці домкратів силомірів, а прогинання рейок – за допомогою електропрогиномірів. Результати вимірювань записувалися за допомогою двохкоординатного самописця, що дозволяло отримувати на планшеті безпосередньо петлю гістерезису, тобто діаграму навантаження – розвантаження рейки [5].

Запропонована методика і створене устаткування дозволили проводити масові вимірювання вертикальної і горизонтальної жорсткості колії, а також жорсткості колії на кручення, набувати значень відповідних модулів пружності колії і характеристик тертя основи.

У подальші роки ДІТом по вказаній методиці були проведені масові вимірювання жорсткості колії різної конструкції, а також жорсткості колії в межах стрілочних переводів [6].

**Виклад матеріалу.** В перші роки вимірювання вертикальних прогинів рейок виконувалися щодо коротких паль довжиною 60-90 см, забитих в баласт безпосередньо біля рейки. ДІТом було виявлене, що в цьому випадку не враховуються прогинання земляного полотна, оскільки паля просідає разом з ним (табл. 1). Був виконаний спеціальний експеримент [7] в прямій ділянці колії в п'яти перерізах були виконані вимірювання прогинань рейок трьома способами: відносно паль, забитих біля рейки; відносно паль, забитих на відстані 1 м від рейки, за допомогою спеціальної рамки; і за допомогою високоточного нівеліра. Як виявилось при вимірюваннях по палі, забитою біля рейки, помилка у величині вертикальної жорсткості колії і модуля його пружності складає приблизно 20–35 % (табл. 1 [7]).

Одночасно з ДІТом в МПТі на базі вагону було змонтовано гідравлічний пристрій навантаження, в якому навантаження, прикладені до рейки, вимірювалися за допомогою електропрогиномірів і записувалися у вигляді осцилограм. По вимірюванням будувалися графіки залежності прогинання від навантаження, і по ним визначалася жорсткість колії. По вказаній методиці практично одночасно почали вимірювати жорсткість колії у ВНІЗТі і НІЗТі.

Пізніше по подібній методиці почали проведення досліджень жорсткості колії і в ЛІЗТі. Відмінність методики вимірювань останнього полягало в тому, що вимірювання проводилися в

динаміці, і навантаження від колеса на рейку вимірювалося за допомогою датчиків, що були прикріплені до шийки рейки.

Таблиця 1

Переріз	Повний прогин рейки в мм при вимірах			U, кгс/см <sup>2</sup> , в інтервалі 4-8 тс при вимірах	
	Нівелювання	по “рамки”	по “палі”	по “рамки”	по “палі”
1	3,60	3,25	2,50	280	400
2	3,90	3,40	2,80	260	340
3	3,70	3,30	2,60	270	375
4	5,00	4,00	2,90	210	325
5	4,15	3,50	2,80	255	340
Середнє	4,05	3,48	2,72	255	356
Ср. кв. відх.	0,56	0,28	0,15	24	27

В результаті залежність прогинання рейки від вертикального навантаження виходить істотно нелінійною, оскільки спочатку відбувається вибірка люфтів. Дослідження ДПТУ показали, що крім вибірки люфтів, на величину просадки рейок впливають сили тертя, що виникають в основі [5].

Також дослідження ДПТУ показали, що випадковому характеру зміни жорсткості по довжині колії властиві і гармонійні складові.

Результати вимірювань показали, що в профілі завантаженої колії при повільному русі рухомого складу виникають як одиночні, так і гармонійні нерівності з випадковими амплітудами і фазами.

І.С. Льованков рекомендував враховувати наявність гармонійних нерівностей і внутрішнього тертя в основі колії при визначенні динамічного модуля пружності шляху по формулі:

$$U_d = U_0 \pm a \cdot V^2 \quad (1)$$

де  $U_0$  – статичний модуль пружності колії;

$V$  – швидкість руху потягів складу в км/год;

$a$  – коефіцієнт, що враховує наявність тертя і нерівностей.

Результати масових вимірювань вертикального модуля пружності колії, проведених ДПТом, з урахуванням жорсткості земляного полотна, приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Характеристика верхньої будови колії	U, кгс/см <sup>2</sup>		
	Середнє значення	Границі вимірів	
		Мінімальне значення	Максимальне значення
Р65 (1) 1840 (11) Щ55, скріплення КБ, стандартне переміщення	175	70	310
Р50 (2) 1840 (ЖБ) Щ50, безстикова колія, скріплення КБ	270	100	420
Р65 (1) 1840 (ЖБ) Щ55 КБ	260	80	500
Р65 (1) 1840 (ЖБ) Щ55 К2	255	80	500
Р65 (1) 1840 (ЖБ) Щ55 ЖБР	210	130	300
Р65 (1) 1840 (ЖБ) Щ55 БП65 при двох варіантах резинових прокладок: а) під рейкою 8 мм, під підкладкою 8 мм б) під рейкою 11 мм, під підкладкою 8 мм	210	140	300
	200	130	270

Отримані результати добре співпадають з даними, отриманими МПТом при вимірюванні прогинів рейки щодо довгих паль, забитих в середину обсадних труб. Вони приведені в таблиці 3. Це ж підтвердили і сучасні дослідження ВНІЗТом (таблиця 4).

Таблиця 3

Ділянки	Підтягування гайок закладних болтів, кгМ	Вертикальне навантаження, т	Основні статистики					
			$n$	$U_z^H$ max	$U_z^H$ min	$\bar{U}_z$	$S$	$\gamma = \frac{s}{\bar{U}_z}$
з. б. шпали	6	4 – 12	94	300	77	186	62	0,33
	12	4 – 12	88	433	108	230	63	0,27
	24	4 - 12	86	433	94	267	85	0,32
з. б. плити	6	4 – 12	94	309	77	174	63	0,36
з. б. плити	12	4 – 12	95	309	94	191	54	0,28
	24	4 – 12	87	386	109	222	73	0,33

Таблиця 4

№ пп	Типи варіантів ВБК	Час року	Методика	Модулі пружності в інтервалі навантажень 4–8 т		
				$\bar{U}_z$ , кгс/см <sup>2</sup>	$U_{min}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$U_{max}$ , кгс/см <sup>2</sup>
1	Р65, ДШ, 2000, ШЦ	зима	нова	248	89	481
2	Р65, ДШ, 2000, ШЦ	зима	стара	668	125	3058
3	Р65, ЖБШ, 2000, ШЦ	зима	нова	580	208	1362
4	Р65, ЖБШ, 2000, ШЦ	зима	стара	1291	266	7705
5	Р65, ДШ, 2000, Ас	зима	нова	309	170	614
6	Р65, ДШ, 2000, Ас	зима	стара	435	208	1547
7	Р65, ДШ, 2000, ШЦ	весна	нова	190	93	496
8	Р65, ДШ, 2000, ШЦ	весна	стара	474	270	799
9	Р65, ЖБШ, 2000, ШЦ	весна	нова	417	174	2474
10	Р65, ЖБШ, 2000, ШЦ	весна	стара	1871	716	3741
11	Р65, ДШ, 2000, ШЦ	літо	нова	163	58	331
12	Р65, ДШ, 2000, ШЦ	літо	стара	378	86	871

Окрім характеристик вертикальної пружності колії, тобто вертикальної жорсткості і вертикального модуля пружності колії, вказаними учбовими і науковими інститутами вимірювалися і інші характеристики жорсткості колії.

Одним з перших, хто запропонував визначати просторові модулі пружності по його відповідній жорсткості був О.П. Єршков [8]. При цьому відповідні жорсткості він рекомендував експериментально визначати з виразів:

$$\beta_z = \frac{\Delta P}{\Delta z}, \beta_y = \frac{\Delta Y}{\Delta y}, \beta_x = \frac{\Delta N}{\Delta \lambda}, \beta_\varphi = \frac{\Delta M_\varphi}{\Delta \varphi} \quad (2)$$

де  $\beta_z, \beta_y, \beta_x, \beta_\varphi$  – жорсткості рейкової нитки при вертикальному, горизонтальному вигині, подовжньому переміщенні і крученні рейки, відповідно;

$\Delta P, \Delta Y, \Delta N, \Delta M_\varphi$  – зміни вертикальною, горизонтальною поперечною, горизонтальною подовжньою сил і моменту, відповідно;

$\Delta z, \Delta y, \Delta \varphi$  – зміни відповідних сил і моменту переміщень рейки;

$\Delta \lambda$  – зміни подовжнього переміщення рейки у напрямі осі ОХ.

У свою чергу, відповідні модулі пружності колії повинні визначатися з виразів [8]:

$$U_z = \sqrt[3]{\frac{\beta_z^4}{(64 \cdot E \cdot I_y)}} \quad (3)$$

$$U_y = \sqrt[3]{\frac{\beta_y^4}{(64 \cdot E \cdot I_z)}} \quad (4)$$

$$U_x = \beta_x \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\Delta \lambda}{\Delta x} \quad (5)$$

$$U_\varphi = \frac{\beta_\varphi^2}{A \cdot G \cdot I_d} \quad (6)$$

де  $U_z$ ,  $U_y$  – модуль пружності рейкової основи при вертикальному і горизонтальному вигині рейкової нитки;

$E$  і  $G$  – модулі пружності рейкового металу на розтягування і на зсув;

$I_y$  і  $I_z$  – моменти інерції поперечного перетину рейки щодо горизонтальної і вертикальної осі, відповідно;

$I_d$  – момент інерції поперечного перерізу рейки щодо поздовжньої осі;

$A$  – коефіцієнт, залежний від типу рейки і характеристик жорсткості підрейкової основи. Він може бути знайдений з виразу, отриманого М.І. Умановим:

$$A = 4 \cdot \left( 1 + \frac{\sqrt{E \cdot I_{\omega} \cdot U_{\phi}}}{G \cdot I_d} \right)^2 \quad (7)$$

де  $I_{\omega}$  – секторний момент інерції поперечного перерізу рейки.

Вимірювання горизонтальної поперечної жорсткості рейок і їх жорсткості на кручення виконувалися в меншому об'ємі, чим їх вертикальній жорсткості.

Просторові характеристики пружності колії були отримані ДПТом і приведені в таблиці 5.

Таблиця 5

№ пп	Інтервали вертикальних навантажень, т	Характеристики пружності рейкової нити в перетинах колії, ( $\beta_y$ (т/мм)/ $U_y$ (кг/см <sup>2</sup> ))		
1	0–16	$\frac{5,65}{285}$	$\frac{5,52}{270}$	–
2	0–12	$\frac{4,84}{225}$	$\frac{4,25}{190}$	$\frac{6,7}{350}$
3	4–8	$\frac{5,72}{285}$	$\frac{6,1}{3,5}$	$\frac{6,75}{355}$
4	8–12	$\frac{10,62}{645}$	$\frac{9,53}{555}$	$\frac{10,7}{650}$
5	8–16	$\frac{8,75}{495}$	$\frac{5,72}{285}$	–

З метою уточнення характеристик пружності колії при різних його станах, що виникають при виконанні путніх робіт і супроводжуваних порушенням цілісності баластної призми, ВНІЗТом спільно з ДПТом були проведені спеціальні випробування.

У цих дослідженнях вперше були отримані всі просторові характеристики жорсткості і петлі гістерезису для одного перерізу колії, включаючи і характеристики подовжньої жорсткості колії. Результати вимірювань жорсткості приведені в таблиці 6.

Таблиця 6

Характеристики жорсткості колії	Одиниці виміру	Границі зміни характеристик в залежності від конструкції колії		
		P50, ДШ	P65, ДШ	P65, ЖБШ
Вертикальна жорсткість	кН/мм	21–36	19–40	45–80
Горизонтальна поперечна жорсткість по головці рейки	кН/мм	6,4–22	9,6–26,6	10–35
Горизонтальна поздовжня жорсткість	кН/мм	–	82,5–90	120
Жорсткість при крученні	кНм/рад	–	174–313	468–880

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведений аналіз показав, що для розрахунків колії на міцність необхідно використовувати значення вертикального модуля пружності колії приведені в таблиці 3 і отримані ДПТом з урахуванням прогинань земляного полотна. Це особливо важливо при розрахунках безстикого колії на залізобетонних шпалах. Необхідно також продовжити вимірювання жорсткості колії при впровадженні нових конструкцій його верхньої будови.

#### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА:

1. Вериго М.Ф. Вертикальные силы действующие на путь при прохождении подвижного состава [Текст] / Вериго М.Ф. // Труды ВНИИЖТ. – 1955. – Вып. 97. – С. 25-288.

2. Шахунянц Г.М. Модули упругости различных подрельсовых оснований и их формирование [Текст] / Шахунянц Г.М., Хазинский Н.М. // В кн: Исследование новых конструкций железнодорожного пути. Труды МИИТа. – 1973.– Вып.382. – С. 30-41.
3. Яковлев В.Ф. Исследования упруго-динамических характеристик пути в горизонтальной плоскости [Текст] /Яковлев В.Ф., Семенов И.И., Фролов Л.Н.// В кн: Исследование работы стрелочных переводов под подвижной нагрузкой. Труды ЛИИЖТа. – 1968. – Вып.280. – С. 82-98.
4. Карманов А.А. О модуле упругости ж. д. пути метрополитенов [Текст] / Карманов А.А., Митюшин Д.В., Шадрин В.Ю.// В книге: Повышение надежности и эффективности работы ж.д. пути в условиях роста осевых нагрузок подвижного состава. – 1989. – С. 77-79.
5. Лазарян В.А. Об экспериментальном определении сил трения в пути [Текст] / Лазарян В.А. и др. // В кн.: Исследования взаимодействия пути и подвижного состава. Труды Дн-ского ин-та инж. ж.-д. транспорта. – 1967. – Вып. 78. – С. 4-14.
6. Леванков И.С. О выборе расчетных значений модуля упругости подрельсового основания [Текст] / Леванков И.С. // В кн: Исследование взаимодействия пути и подвижного состава. Труды Дн-ского ин-та инж. ж.-д. транспорта.– 1967. – Вып. 88. – С. 83-88.
7. Воробейчик Л.Я. Некоторые результаты экспериментального определения жесткости пути [Текст] / Воробейчик Л.Я. // В кн: Исследование взаимодействия пути и подвижного состава. Труды Дн-ского ин-та инж. тр-та. – 1974. – Вып. 148. – С. 9-16.
8. Ершков О.П. Характеристики пространственной упругости рельсовой нити [Текст] / Ершков О.П. // Тр. ВНИИЖТ. – 1960. – Вып. 192. – С. 59-101.