

УДК 625.11

Д. М. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 37 31 542, ел. пошта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000–0002–9448–5269

ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ РОЗРАХУНКУ КОЛІЇ НА МІЦНІСТЬ ІЗ УРАХУВАННЯМ НЕРІВНОПРУЖНОСТІ ПІДРЕЙКОВОЇ ОСНОВИ

Мета. Модуль пружності підрейкової основи є однією з основних характеристик для оцінки напружено-деформаційного стану залізничної колії. Питання щодо необхідності в різних випадках враховувати нерівнопружність підрейкової основи вже розглядалася, однак результати містять доволі складні математичні підходи та не вкладаються в межі стандартного інженерного розрахунку колії на міцність. Тому метою даною роботи є отримання рішення в рамках припущень та наробок зазначеного документу. **Методика.** Пропонується в якості моделі розглядати рейку як балку, котра має суцільне навантаження з таким обрисом, відповідним до значення модуля пружності, що дає еквівалентний прогин при вільному обпиранні на опори. У цьому випадку нерівномірність модуля пружності враховується відповідною зміною обрису навантаження і, з деякими припущеннями, дає змогу отримати корективи для загальновідомих залежностей. **Результати.** Отримано метод врахування поступової зміни модуля пружності підрейкової основи введенням корегувального коефіцієнту в інженерний розрахунок колії на міцність. Розроблено розширення існуючого розрахунку колії на міцність для врахування різкої зміни модуля пружності підрейкової основи (наприклад, при переході з баластної конструкції колії на міст). Отримано характеристику зміни сил, діючих від рейки на основу, в залежності від відстані до моста на ділянці підходу з баластної конструкції колії. Отримані результати перерозподілу дії сил при різкій зміні модуля пружності підрейкової основи пояснюють утворення вертикальних нерівностей перед мостом. **Наукова новизна.** Удосконалено методику інженерного розрахунку колії на міцність для виконання розрахунків із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи. **Практична значимість.** Отримані результати дозволять виконувати інженерні розрахунки для оцінки міцності колії в місцях нерівнопружності, обумовленої станом колії або особливостями конструкції. Також стає можливою вирішення зворотної задачі – визначення модуля пружності підрейкової основи за результатами натурних вимірювань напружень в рейках (з урахуванням зазначених умов).

Ключові слова: розрахунок колії на міцність; модуль пружності підрейкової основи; нерівнопружність підрейкової основи; напруження в колії

Вступ

Модуль пружності підрейкової основи є однією з основних характеристик для оцінки напружено-деформаційного стану залізничної колії. Він визначає зв'язок між діючою силою і деформацією – одне з положень, на якому базується сучасний метод інженерного розрахунку колії на міцність.

Під модулем пружності в рівняннях інженерного розрахунку колії на міцність мається на увазі рівномірно розподілена жорсткість підрейкової основи. Від значення цього показника значно залежать результати розрахунків – й прогини, й напруження. Питання з адекватного врахування і вимірювання модуля пружності перш за все пов'язані зі складністю фізичного процесу, що відбувається. На модуль пружності підрейкової основи впливають властивості всіх елементів колії: шпали, підкладки, баласту, зе-

мляного полотна тощо. Його значення складається з жорсткості кожного з елементів, але не в рівній мірі, а з урахуванням їх вкладу у загальну деформацію на мить дії. Ступінь їх вкладу буде суттєво залежати від динаміки процесу. Чим меншу жорсткість має шар, тим більша частина прогину буде реалізовуватися саме за рахунок його деформації.

Нерівнопружність підрейкової основи може виникати у різних випадках. Це може бути наслідок порушень стану залізничної колії – наявність просядок, непридатних скріплень, забруднення баласту тощо [7]. Найбільш чутливими до розвинення місць нерівнопружності є ділянки з інтенсивним рухом [3] або з обпиранням на слабкі ґрунти [13].

Існує методика розрахунку дійсного модуля пружності ділянки колії на основі натурального вимірювання напружень в рейках від поїзного на-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

вантаження, яка являє собою вирішення оберненої задачі інженерного розрахунку колії на міцність. Досвід застосування такої методики у роботах Колієвипробувальної галузевої науково-дослідної лабораторії ДНУЗТу виявив випадки, коли неможливо отримати адекватні результати. Це мало місце на ділянках з суттєвим порушенням стану колії, наприклад з наявністю просадки третього ступеня [1].

З іншого боку, нерівнопружність може бути зумовлена самою конструкцією залізничної колії – це місця перед мостами та шляхопроводами. У цьому випадку може спостерігатися як різка зміна модуля пружності при безпосередньому примиканні звичайної конструкції колії до безбаластної, так і більш-менш поступова за рахунок застосування перехідних ділянок, розробка ефективних конструкцій яких триває до сьогодні [8, 10].

Мета

Питання необхідності в різних випадках враховувати нерівнопружність підрейкової основи вже розглядалися в роботах декількох авторів, наприклад [6, 9, 10, 12, 14]. При цьому було застосовано різні математичні методи: розвиток моделі колії, як балки на дискретних опорах [6, 9]; модель в'язко-пружних стержнів [12, 13] тощо. Було отримано адекватні рішення в рамках поставлених задач. Однак, результати містять доволі складні математичні підходи і не вкладаються в межі стандартного інженерного розрахунку колії на міцність [5]. Тому метою цієї роботи є отримання рішення в рамках припущень та наробіток зазначеного документа.

Квінтесенція методики інженерного розрахунку на міцність – диференційне рівняння прогину рейки – визначено саме для рівнопружної основи. Тому використання математичних співвідношень, отриманих на його ґрунті, неможливе для випадків, коли модуль пружності різний в межах довжини прогину рейки. Безпосереднє введення модуля пружності як функції від шляху у рівняння прогину рейки унеможливило отримання аналітичних рішень.

Пропонується як модель розглядати рейку як балку, яка має суцільне навантаження з обрисом, відповідним до значення модуля пружності, що дає еквівалентний прогин при вільному обпиранні на дві опори. У цьому випадку нерівномірність модуля пружності враховується

відповідною зміною обриса навантаження і, з деякими припущеннями, дає змогу отримати корективи для загальновідомих залежностей.

Методика

Діюча на сьогодні методика практичного розрахунку колії на міцність, яка використовується для вирішення низки задач взаємодії колії і рухомого складу, викладено в інструкції ЦП–0117 [5]. Теоретичні передумови методики розрахунку наведено в декількох джерелах, наприклад [4, 11]. Аналіз методики з точки зору врахування різних факторів, у тому числі й модуля пружності підрейкової основи, було здійснено автором в рамках роботи [2], присвяченої аналізу альтернативних методик розрахунку напружено-деформованого стану залізничної колії, зокрема й обґрунтуванню загальних принципів формування моделі колії на основі теорії розповсюдження пружних хвиль.

Нагадаємо, що як основну модель для розрахунку колії на міцність прийнято балку нескінченної довжини, яка опирається на рівнопружну основу і сприймає навантаження від поодинокій вертикальної сили, рис. 1.

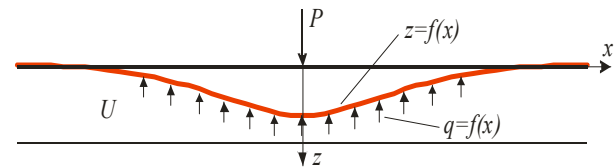


Рис. 1. Розрахункова схема прогину балки на рівнопружній основі

Fig. 1. Design scheme of beam deflection on an elastic foundation

Тоді деформований стан балки буде описуватися загальновідомим диференціальним рівнянням

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} + Uz = 0, \quad (1)$$

де EI – жорсткість балки (рейки) на прогин; z – вертикальний прогин рейки; x – відстань по рейці від точки прикладання сили; U – модуль пружності підрейкової основи.

Одним з базових припущень такого підходу є пряма залежність між реактивним опором основи (q) і прогином рейки

$$q(x) = Uz(x). \quad (2)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Якщо

$$U = \text{const}, \quad (3)$$

то розв'язання рівняння (1) з урахуванням певних граничних умов відомо

$$z(x) = \frac{Pk}{2U} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (4)$$

де P – вертикальна сила, діюча на рейку; k – коефіцієнт відносної жорсткості

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}. \quad (5)$$

Безпосереднє введення модуля пружності як функції від шляху $U = f(x)$ у рівняння прогину рейки (1) унеможлиблює отримання аналітичних рішень для застосування в інженерних розрахунках. Формули, які отримані на основі рівняння (1) і його рішення (4) для розрахунку згинаючого моменту в перерізі рейки, поперечної сили тощо і, як наслідок, напружень в елементах залізничної колії [5], не можуть бути використані для окремого перерізу з відомим модулем пружності підрейкової основи. Для їх адекватності умова (3) повинна виконуватися хоча б на довжині відчутного прогину рейки

$$\forall x \in \{z(x) \neq 0\} | U(x) = \text{const}. \quad (6)$$

Залежно від величини модуля пружності підрейкової основи довжина прогину рейки може складати приблизно від 3 до 6 метрів.

Для вирішення задачі в умовах невиконання умови (6), пропонується розглянути альтернативну розрахункову схему: рейка приймається як балка, що вільно опирається на дві опори і прогинається від розподіленого навантаження $q = f(x)$, рис. 2. При відповідному обрисі навантаження і відстані між опорами, такий підхід дає результат тотожний попередньо розглянутому.

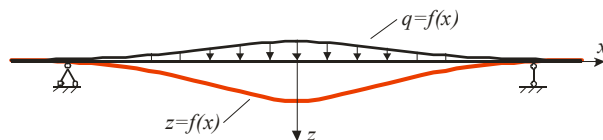


Рис. 2. Розрахункова схема прогину балки при обпиранні на опори

Fig. 2. The design model of beam deflection during the rest on supports

При виконанні умови (6) для тотожності розрахункових схем обрис навантаження визначається з рівняння (1) за загальновідомими диференціальними співвідношеннями характеристик прогину балки

$$q(x) = \frac{Pk}{2} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx). \quad (7)$$

Таким чином, для отримання розрахункової схеми, яка буде відповідати змінному модулю пружності підрейкової основи $U = f(x)$, достатньо задати відповідний обрис навантаження $q = f(x)$.

Розглянемо випадок, коли модуль пружності змінюється лінійно. На рис. 3 зображено обрис зміни навантаження по довжині рейки для двох випадків: 1 – для постійного значення модуля пружності підрейкової основи U_1 , що відповідає рівнянню (7); 2 – для лінійного збільшення модуля пружності від U_1 у точці прикладення сили до U_2 у точці під умовною опорою.

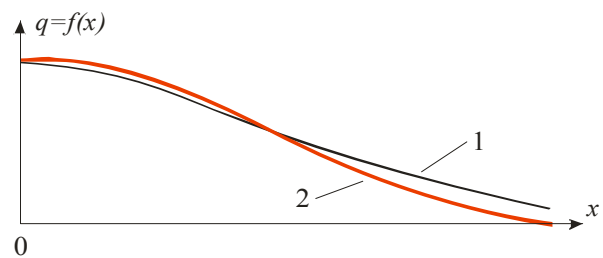


Рис. 3. Обрис розподілення навантаження по довжині рейки:

1 – для постійного значення модуля пружності (U_1); 2 – для лінійного збільшення модуля пружності (від U_1 до U_2)

Fig. 3. The shape of the load compartment along the length of rails:

1 – for constant values of modulus of elasticity (U_1); 2 – for a linear increase of module elasticity (from U_1 to U_2)

Для виконання подальших розрахунків доцільно подати навантаження, як дві складові: q_1 і q_2

$$\left. \begin{aligned} q &= q_1 + q_2; \\ q_1 &= f(x) : U = U_1; \\ q_2 &= f(x) : U = U_1 \dots U_2 / q_1 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Тоді обрис навантаження q_1 відповідає лінії «1» на рис. 3, а обрис навантаження q_2 наведено на рис. 4.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

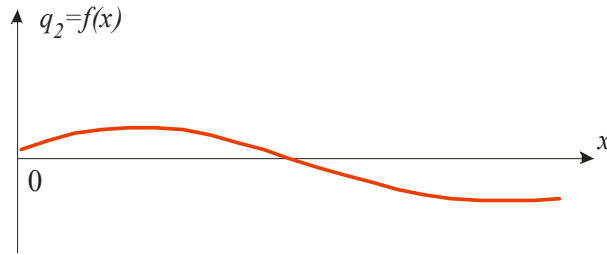


Рис. 4. Обрис додаткового навантаження (q_2) по довжині рейки

Fig. 4. Shape of additional load (q_2) along the length of the rail

Як виявили дослідження, у межах ділянки прогину функцію $q_2 = f(x)$ зручно апроксимувати поліномом виду

$$q_2 \left(x \in \left[0 \dots \frac{3\pi}{4k} \right] \right) = ax'^3 + bx'^2 + cx', \quad (9)$$

де $x' \approx \frac{3\pi}{4k} - x$; $k = f(U_1)$.

Виходячи з загальновідомих співвідношень характеристик прогину балки, можна визначити згинальний момент

$$M(x) = \iint q_1 dx dx + \iint q_2 dx dx. \quad (10)$$

Перша складова формули (10) визначається з рівняння (7), а друга – з рівняння (9)

$$M \left(x \in \left[0 \dots \frac{3\pi}{4k} \right] \right) = \frac{P}{4k} e^{-kx} (\cos kx - \sin kx) + \frac{Pk}{4} \left(\frac{ax'^5}{10} + \frac{bx'^4}{6} + \frac{cx'^3}{3} \right). \quad (11)$$

Графік зміни згинального моменту по довжині рейки зображено на рис. 5 для постійного модуля пружності підрейкової основи (U_1) і за формулою (11) для умов збільшення модуля пружності від U_1 до U_2 .

Як видно з рис. 5, в місці меншого модуля пружності підрейкової основи відбувається збільшення згинального моменту за рахунок перерозподілу прогину рейки з зони більш жорсткого обпирання до зони більш податливого.

Напевно, для корекції саме інженерного розрахунку достатньо обійтися коефіцієнтом k_M , який буде враховувати збільшення згина-

льного моменту (а відповідно і максимально вірогідних згинальних напружень в рейці) для перерізу збігу сили з найменшим модулем підрейкової основи

$$M_{U_1 \dots U_2}^{\max} = (1 + k_M) M_{U_1}^{\max}. \quad (12)$$

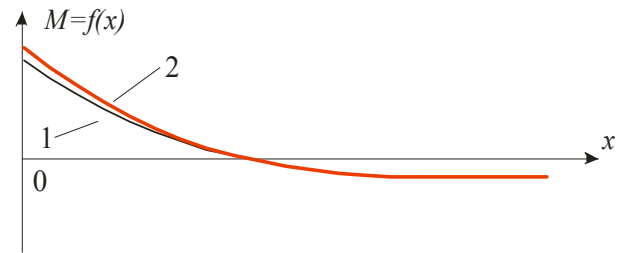


Рис. 5. Зміна згинального моменту по довжині рейки:

1 – для постійного значення модуля пружності (U_1); 2 – для лінійного збільшення модуля пружності (від U_1 до U_2)

Fig. 5. The change of bending moment along the length of rails:

1 – for the constant values of modulus of elasticity (U_1); 2 – for a linear increase of the modulus of elasticity (from U_1 to U_2)

Розглянемо інший випадок нерівнопружності підрейкової основи. При примиканні звичайної конструкції колії до безбаластної (підхід до моста) спостерігається дуже різка зміна модуля пружності підрейкової основи. Такий перехід не може бути описано за наведеною вище методикою. Враховуючи дуже велику жорсткість колії на мосту, можна прийняти відсутність прогину підрейкової основи. В такому разі як розрахункову схему пропонується використовувати наведену на рис. 1, але прийняти, що з одного боку (примикання до моста) рейка обпирається на опору, рис. 6.

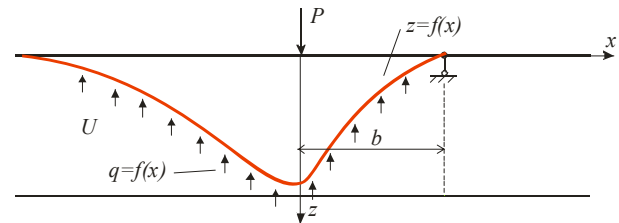


Рис. 6. Розрахункова схема прогину балки на ділянці підходу до моста

Fig. 6. Design scheme of the beam deflection at the site of the approach to the bridge

Прогин балки буде описуватися класичним рівнянням – формула (1). При його розв'язанні

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

наявність обпирання балки на опору буде враховане відповідною граничною умовою

$$z(b) = 0, \quad (14)$$

де b – відстань від точки прикладання сили (положення колеса) до моста.

Тоді прогин рейки (формула (4)) в частині від точки прикладання сили до моста буде визначатися за формулою

$$z(x) = \frac{Pke^{-kx}}{U(1-tg\beta)}(-tg\beta \cos kx + \sin kx), \quad (13)$$

де $\beta = kb$ – показник відстані до моста.

Інші важливі характеристики – згинальний момент та сила, діюча на опору (використовується в інженерному розрахунку на міцність [5] для розрахунку напружень на поверхні шпали, в баласті та на основній площадці земляного полотна) – будуть визначатися за такими формулами, отриманим за загальновідомими диференціальними співвідношеннями характеристик прогину балки:

$$M(x) = \frac{Pe^{-kx}}{2k(1-tg\beta)}(\cos kx + tg\beta \sin kx); \quad (15)$$

$$Q(x) = \frac{Pkle^{-kx}}{1-tg\beta}(-tg\beta \cos kx + \sin kx), \quad (16)$$

де l – відстань між осями шпал.

Формули (14...16) не протирічять відповідним виразам у інженерних розрахунках на міцність [5], і можуть бути долучені до них безпосередньо.

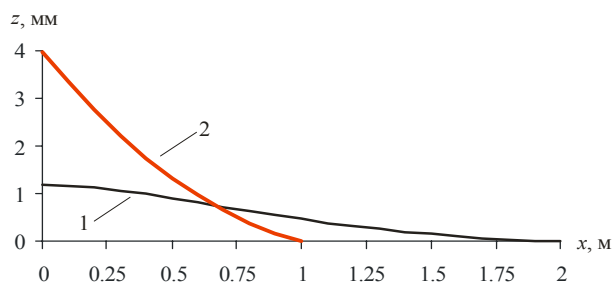


Рис. 7. Прогин рейки по довжині від точки прикладання сили:
1 – без примикання до моста; 2 – з примиканням до моста на відстані 1 м

Fig. 7. The beam deflection along the length from the point of force application:
1 – without adjunction to the bridge; 2 – with adjunction to the bridge at a distance of 1 m

Розглянемо приклад розрахунку ділянки колії з модулем пружності підрейкової основи 50 МПа з примиканням до моста на відстані 1 м від точки прикладання сили у 100 кН. Початок відліку по осі абсцис відповідає точці прикладання сили. Графік прогину рейки зображено на рис. 7 (лінія «2»). Для порівняння зображено прогин для випадку відсутності примикання до моста (лінія «1»).

Графіки зміни згинального моменту в рейці і сили, що діє від рейки на опору, для відповідних випадків зображено на рис. 8 і 9 відповідно.

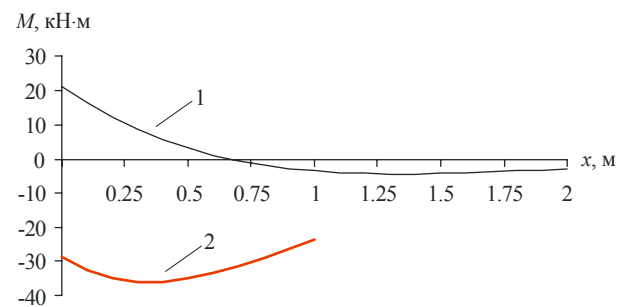


Рис. 8. Згинальний момент в рейці по її довжині:
1 – без примикання до моста; 2 – з примиканням до моста на відстані 1 м

Fig. 8. The bending moment at the rail along its length:
1 – without adjunction to the bridge; 2 – with adjunction to the bridge at a distance of 1 m

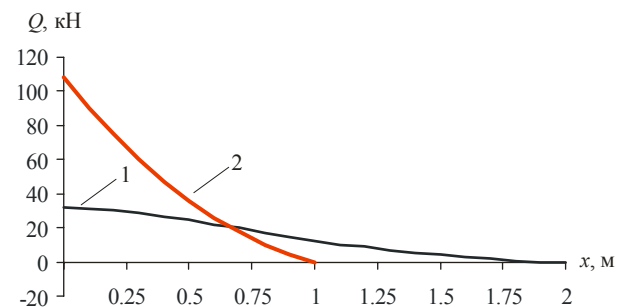


Рис. 9. Сила, діюча від рейки на опору:
1 – без примикання до моста; 2 – з примиканням до моста на відстані 1 м

Fig. 9. The force acting from the rail support:
1 – without adjunction to the bridge; 2 – with adjunction to the bridge at a distance of 1 m

За наведеними графіками видно значний якісний і чисельний перерозподіл зазначених характеристик прогину рейки. Якщо згинальний момент (і відповідно згинальні напруження в рейці) змінює знак, але залишається приблизно того ж самого рівня, то сила, діюча на опору (і відповідно напруження в баласті і на основній площадці земляного полотна), зростає у 3,4

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

разу. Якщо проаналізувати залежність цього показника від відстані точки прикладання сили до моста, то можна зазначити, що має місце набагато більше зростання сили, діючої на підрейкові елементи колії. Якісно такий графік зображено на рис. 10.

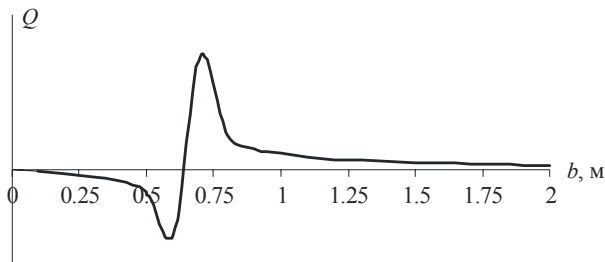


Рис. 10. Сила, діюча від рейки на опору залежно від відстані між точкою прикладання сили і початком моста

Fig. 10. The force acting on the rail for support, depending on the distance between the point of force application and the beginning of the bridge

Виходячи з рівняння (16), максимальна дія на підрейкову основу буде мати місце на відстані $\frac{\pi}{2k}$ між колесом і початком моста. Для розглянутого прикладу ця відстань складає приблизно 0,7 м.

Результати

Значення коефіцієнта k_M (формула (12)), визначеного за вищенаведеною методикою, для різних варіантів зміни модуля пружності наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта k_M залежно від зміни модуля пружності підрейкової основи

Table 1

The k_M coefficient value depending on changes in the elastic modulus in the rail base

U_1 , МПа	U_2 , МПа			
	30	40	50	60
20	0,077	0,115	0,130	0,131
30		0,044	0,063	0,067
40			0,022	0,029
50				0,008

Так, наприклад, при зміні модуля пружності від 20 МПа в точці прикладання сили (розташування колеса) до 50 МПа на кінці зони прогину, значення згинального моменту зростає на 13 % (це навіть порівняно з розрахунком для рівнопружної основи з меншим значенням модуля пружності. Така зміна модуля пружності може відповідати місцю на колії з суттєвою просадкою. В такому разі зростання модуля пружності напевно буде відбуватися в обидві сторони. Тоді значення коефіцієнта k_M повинно бути подвоєно і збільшення згинального моменту буде складати вже 26 %. Тоді формула (12) набуде такого вигляду

$$M_{U_1 \dots U_2}^{\max} = (1 + 2k_M) M_{U_1}^{\max}. \quad (17)$$

Якщо модуль пружності підрейкової основи в перерізі під силою достатньо великий (50 МПа та більше), то подальше його збільшення по довжині рейки (в реальних межах) не приводить до відчутного перерозподілу прогину рейки.

Якщо значення модуля пружності по краях зони прогину рейки достатньо велике (60 МПа та більше), то наявність під силою «м'якого» місця вже не приводить до подальшого збільшення згинального моменту, що пояснюється неможливістю рейки за таких умов прогнутися відповідно до рівняння (1) і при цьому забезпечити виконання умови (2).

Перехід в межах прогину рейки з більшого модуля пружності на менший не розглядається – в такому випадку в перерізі під силою не буде спостерігатися зростання згинального моменту і відповідно згинальних напружень в рейці.

Отриманні результати перерозподілу дії сил при різкій зміні модуля пружності (рис. 10) пояснюють першопричину утворення вертикальних нерівностей перед мостом. На подальший розвиток нерівності (більш пологому поширені далі від моста), окрім зазначених причин, будуть впливати динамічні ефекти дії від проходження рухомого складу по вже наявній нерівності колії, досліджені, наприклад, в роботі [10].

Наукова новизна і практична значимість

Удосконалено методику інженерного розрахунку колії на міцність для виконання розрахунків з урахуванням нерівнопружності підрейкової основи.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Отримані результати дозволять виконувати інженерні розрахунки для оцінки міцності колії в місцях нерівнопружності зумовленої станом колії або особливостями конструкції. Також стає можливою вирішення оберненої задачі – визначення модуля пружності підрейкової основи за результатами натурних вимірювань напружень в рейках – з урахуванням зазначених умов.

Висновки

1. Отримано метод врахування поступової зміни модуля пружності підрейкової основи – формули (12) і (17) – засобом корегульованого коефіцієнта (табл. 1) в межах інженерного розрахунку колії на міцність.

2. Встановлено, що наявність локального зменшення пружності підрейкової основи (наприклад, у місці просадки) може збільшувати згинаючи напруження в рейках до 1,25 разу.

3. Розроблено розширення інженерного розрахунку колії на міцність – формули (15) і (16) – для врахування різкої зміни модуля пружності підрейкової основи (наприклад, при переході з баластної конструкції колії на міст).

4. Отримано характеристику зміни сил (рис. 10), діючих від рейки на основу, залежно від відстані до моста на ділянці підходу з баластної конструкції колії, що дає інструмент для оцінювання та прогнозування розвитку нерівностей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бондаренко, І. О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, В. Є. Савлук // Зб. наук. пр. ДонІЗТ. – 2012. – Вип. 31. – С. 225–230.
- Бондаренко, І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформаційного стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 1 (43). – С. 139–148.
- Гавриленко, А. К. Учет жесткости железнодорожного пути / А. К. Гавриленко // Путь и путевое хоз-во. – 2007. – № 4. – С. 37–39.
- Даніленко, Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес. – 2010. – Т. 2. – 456 с.
- Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
- Климов, В. И. Статический расчет пути как балки на опорах с нелинейной жесткостью / В. И. Климов, В. В. Рыбкин // Исслед. взаимодействия пути и подвижного состава : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск. – 1984. – Вып. 235/26. – С. 3–8.
- Лихтбергер, Б. Железнодорожный путь : справ. / Б. Лихтбергер. – Гамбург : DVV Media Group GmbH, 2010. – 434 с.
- Савин, А. Переход от балластного пути к безбалластному / А. Савин // Укр. залізниц. – 2014. – № 3 (9). – С. 56–59.
- Сисин, М. Дослідження динамічних коливань балки на пружній дисипативній основі під дією рухомого навантаження при проходженні силової нерівності колії / М. Сисин, В. Рибкін, О. Патласов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2004. – Вип. 5. – С. 188–193.
- Талавіра, Г. М. Осідання основної площадки земляного полотна від рухомого складу на перехідних ділянках перед штучними спорудами / Г. М. Талавіра // Зб. наук. пр. Київ. ун-ту екон. і технол. трансп. Сер. : «Трансп. системи і технології». – Київ, 2003. – Вип. 4. – С. 80–84.
- Чернышов, М. А. Практические методы расчета пути / М. А. Чернышов. – Москва : Транспорт, 1967. – 236 с.
- Behandlung des Schotters als Vielkörper System mit wechselnden Bindungen / H. Kruse, K. Popp, H.-G. Matuttis, A. Schinner // Eisenbahningenieur. – 2001. – № 2. – P. 30–34.
- Gerstberger, U. Modellierung des Schotters in der Gleisdynamik / U. Gerstberger, K. Knothe, R. Sie-laff-Opoku // Eisenbahningenieur. – 2003. – № 9 (54). – P. 24–30.
- Koch, E. A mélykeveréses technológia vasútpítési alkalmazásának lehetőségei / E. Koch, S. Róbert // SÍNEK VILÁGA. – 2013. – № 2. – P. 9–14.

Д. Н. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 37 31 542, эл. почта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000–0002–9448–5269

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ РАСЧЕТА ПУТИ НА ПРОЧНОСТЬ С УЧЕТОМ НЕРАВНОУПРУГОСТИ ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ

Цель. Модуль упругости подрельсового основания является одной из основных характеристик для оценки напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути. Необходимость в разных случаях учитывать неравноупругость подрельсового основания неоднократно рассматривалась, однако результаты содержали достаточно сложные математические подходы, а полученные решения не укладывались в границы стандартного инженерного расчета пути на прочность. Поэтому целью данной работы является получение решения в рамках допущений и наработок обозначенного документа. **Методика.** Предлагается в качестве модели рассматривать рельс как балку, которая имеет распределенную нагрузку такого очертания, соответствующего значению модуля упругости, что дает эквивалентный прогиб при свободном размещении на опорах. **Результаты.** Получен метод учета постепенного изменения модуля упругости подрельсового основания введением корректирующего коэффициента в инженерный расчет пути на прочность. Разработано расширение существующего расчета пути на прочность для учета резкого изменения модуля упругости подрельсового основания (например, при переходе с балластной конструкции пути на мост). Получена характеристика изменения сил, действующих от рельса на основу, в зависимости от расстояния до моста на участке подхода с балластной конструкции пути. Полученные результаты перераспределения действия сил при резком изменении модуля упругости подрельсового основания объясняют образование вертикальных неровностей перед мостом. **Научная новизна.** Усовершенствована методика инженерного расчета пути на прочность для выполнения расчетов с учетом неравноупругости подрельсового основания. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют выполнять инженерные расчеты для оценки прочности пути в местах неравноупругости, обусловленной состоянием пути или особенностями конструкции. Также возможно решение обратной задачи – определение модуля упругости подрельсового основания по результатам натурных измерений напряжений в рельсах (с учетом приведенных условий).

Ключевые слова: расчет пути на прочность; модуль упругости подрельсового основания; неравноупругость подрельсового основания; напряжения в пути

D. M. KURHAN^{1*}

^{1*}Dep. «Railway and Railway's Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 37 31 542, e-mail kurgan@brailsys.com, ORCID 0000–0002–9448–5269

TO THE SOLUTION OF PROBLEMS ABOUT THE RAILWAYS CALCULATION FOR STRENGTH TAKING INTO ACCOUNT UNEQUAL ELASTICITY OF THE SUBRAIL BASE

Purpose. The module of elasticity of the subrail base is one of the main characteristics for an assessment intense the deformed condition of a track. Need for different cases to consider unequal elasticity of the subrail base repeatedly was considered, however, results contained rather difficult mathematical approaches and the obtained decisions didn't keep within borders of standard engineering calculation of a railway on strength. Therefore the purpose of this work is obtaining the decision within this document. **Methodology.** It is offered to consider a rail model as a beam which has the distributed loading of such outline corresponding to value of the module of elasticity that gives an equivalent deflection at free seating on bearing parts. **Findings.** The method of the accounting of gradual change of the module of elasticity of the subrail base by means of the correcting coefficient in engineering calculation of a way on strength was received. Expansion of existing calculation of railways strength was developed for the accounting of sharp change of the module of elasticity of the subrail base (for example, upon transition from a ballast design of a way on the bridge). The characteristic of change of forces operating from a rail on a basis, depending on distance to

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

the bridge on an approach site from a ballast design of a way was received. The results of the redistribution of forces after a sudden change in the elastic modulus of the base under the rail explain the formation of vertical irregularities before the bridge. **Originality.** The technique of engineering calculation of railways strength for performance of calculations taking into account unequal elasticity of the subrail base was improved. **Practical value.** The obtained results allow carrying out engineering calculations for an assessment of strength of a railway in places of unequal elasticity caused by a condition of a way or features of a design. The solution of the return task on definition of the module of elasticity of the subrail base by results of natural measurements of tension in rails taking into account the given conditions is also possible.

Keywords: railways calculation for strength; module of elasticity of the subrail base; unequal elasticity of the subrail base; tension in a railway

REFERENCES

1. Bondarenko I.O., Kurgan D.M., Savluk V.E. Vyznachennia metodyky rozrakhunku modulua pruzhnosti pidreikovoї osnovy za rezul'tatamy eksperymentalnykh vymiriuvan pokaznykiv vzaiemodii kolii i rukhomoho skladu [Definition of a design procedure for the module of elasticity of the rails basis for experimental measurements of indicators of a way and a rolling stock interaction]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu* [Proc. of Donetsk Institute of Railway Transport], 2012, issue 31, pp. 225-230.
2. Bondarenko I.O., Kurgan D.M. Vyrishennia zadach nadiinosti systemy na osnovi modeliuвання napruzhenodeformatsiynoho stanu zaliznychnoi kolii zasobamy teorii rozpovsiudzhennia pruzhnykh khvyl [The solution of problems of reliability of system on the basis of modeirovany intense the deformed condition of the railway way means of the theory of distribution of elastic waves]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 1 (43), pp. 139-148.
3. Gavrilenko A.K. Uchet zhestkosti zheleznodorozhnogo puti [Accounting of rigidity of a railway]. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2007, no. 4, pp. 37-39.
4. Danilenko E.I. *Zaliznychna koliia. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaiemodiia z rukhomym skladom* [Railway track. Structure, planning and calculations, interaction with rolling stock]. Kyiv, Inpres Publ., 2010, vol. 2. 456 p.
5. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist. TsP-0117* [TsP-0117. The computations rules of the railway track for strength and stability]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2004. 64 p.
6. Klimov V.I., Rybkin V.V. Sticheskiy raschet puti kak balki na oporakh s nelineynoy zhestkostyu [Static calculation of a way as a beam on support with nonlinear rigidity]. *Issledovaniya vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostva. Mezhevuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Studies of the way and rolling stock interaction. Interuniversity Proc.], 1984, issue 235/26, pp. 3-8.
7. Likhtberger B. *Spravochnik «Zheleznodorozhnyy put»* [Reference textbook «Railway track»]. Gamburg, DVV Media Group GmbH Publ., 2010. 434 p.
8. Savin A. Perekhod ot ballastnogo puti k bezballastnomu [Transition from a ballast way to the ballastless]. *Ukrainski zaliznytsi – Ukrainian Railways*, 2014, no. 3 (9), pp. 56-59.
9. Sysyn M., Rybkin V., Patlasov O. Doslidzhennia dynamichnykh kolyvan balky na pruzhnii dysypatyvniї osnovi pid diieiu rukhomoho navantazhennia pry prokhodzhenni sylovoi nerivnosti kolii [Researches of dynamic fluctuations of a beam on an elastic basis from action of moving loading when passing power roughness of a way]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2004, no. 5. pp. 188-193.
10. Talavira H.M. Osidannia osnovnoi ploshchadky zemlianoho polotna vid rukhomoho skladu na perekhidnykh diliankakh pered shtuchnyimi sporudamy [Deposit of the main platform of a road bed from a rolling stock on transitional sites before artificial constructions] *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohii transportu: Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii»* [Proc. of Kiev University of Economics and technology transport: Series «Transport systems and technologies»], 2003, issue 4, pp. 80-84.
11. Chernyshov M.A. *Prakticheskiye metody rascheta puti* [Practical method of the track computation]. Moscow, Transport Publ., 1967. 236 p.
12. Kruse H., Popp K., Matuttis H.-G., Schinner A. Behandlung des Schotters als Vielkörper System mit wechselnden Bindungen. *Eisenbahningenieur*, 2001, no. 2., pp. 30-34.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

13. Gerstberger U., Knothe K., Sielaff-Opoku R. Modellierung des Schotters in der Gleisdynamik. *Eisenbahningenieur*, 2003, no. 9 (54), pp. 24-30.
14. Koch E. dr. Szepesházi R. A mélykeverés technológia vasútépítési alkalmazásának lehetőségei. *SÍNEK VILÁGA*, 2013, issue 2, pp. 9-14.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. В. Рибкіним (Україна); д.т.н., проф. Е. І. Даниленком (Україна)

Надійшла до редколегії 25.09.2014

Прийнята до друку 20.11.2014