

БУДІВЕЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра колії та колійного господарства

**УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ
КОНСТРУКЦІЇ КОЛІЇ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

«УПРАВЛІННЯ КОЛІЙНИМ ГОСПОДАРСТВОМ»

Харків 2018

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри колії та колійного господарства 5 червня 2018 р., протокол № 15.

У методичних вказівках розглядаються питання, які стосуються заходів з управління технічним станом конструкції верхньої будови безстикової колії.

Рекомендуються для студентів усіх форм навчання, які вивчають дисципліну «Управління колійним господарством».

Укладачі:

доценти А. М. Штомпель,
О. О. Скорик

Рецензент

проф. В. П. Шраменко

УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ
КОНСТРУКЦІЇ КОЛІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

«УПРАВЛІННЯ КОЛІЙНИМ ГОСПОДАРСТВОМ»

Відповідальний за випуск Штомпель А. М.

Редактор Еткало О. О.

Підписано до друку 11.06.18 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 25. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Управління строком служби рейкових плітей їх профільним шліфуванням	4
2 Управління строком служби рейкових плітей за рахунок збільшення їх довжини	14
3 Управління технічним станом колії через підсилення її підшпальної основи	20
4 Управління технічним станом конструкції ВБК	25
Список літератури	28

Вступ

Управлінню у колійному господарстві залізниць, зокрема, підлягають провідний виробничий процес (технічне обслуговування конструкції колії) та якість основної продукції (технічний стан конструкції колії протягом усього її «життєвого» циклу).

Нижче розглядаються питання, які стосуються заходів з управління технічним станом конструкції безстикової колії. При цьому використовувалися матеріали [1-3].

1 Управління строком служби рейкових плітей їх профільним шліфуванням

Конструкція залізничної колії (ЗК) функціонує в умовах силової дії з боку рухомого складу. Рівень цього навантаження, зокрема, зумовлюється наявністю нерівностей на поверхні кочення рейок. При проходженні коліс поїзда через ці нерівності виникають додаткові динамічні сили, які викликають появу підвищених напружень в елементах конструкції ЗК, що у свою чергу призводить до скорочення строку їх служби. Окрім того, більш інтенсивним стає процес зростання несправностей (розладів) колії, погіршуються умови взаємодії рухомого складу та конструкції ЗК.

У процесі експлуатації при напрацюванні тоннажу нерівності на поверхні кочення рейок розвиваються. При цьому зміна їх глибини характеризується такою залежністю:

$$e_{\text{нер}} = 0,0183T^2 - 0,044T + 0,5599, \quad (1.1)$$

де $e_{\text{нер}}$ – глибина нерівності на головці рейки, мм / пог.м;

T – напрацьований тоннаж, млн т бруто.

Під поїзним навантаженням у рейках виникають додаткові динамічні сили. Природа їх появи зумовлена силами інерції, що з'являються при коливанні необресореної маси екіпажа. Для визначення величини цих сил застосовується відома гіпотеза, яка передбачає, що пружна лінія вигину рейки (у вертикальній

площині) під динамічним навантаженням відповідає пружній лінії вигину від статичного навантаження, величина якого чисельно дорівнює значенню динамічної сили $P_{\text{верт}}$ у певний момент часу.

При такій передумові величина $P_{\text{верт}}$ складається зі статичного навантаження колеса на рейку $P_{\text{ст}}$ та динамічних додатків, що зумовленні коливаннями кузова (сила $P_{\text{рес}}$) й необресореної маси екіпажа при наявності нерівностей на колії та колесі (відповідно сила $P_{\text{нер}}$ і сила $P_{\text{кол}}$).

У цьому випадку вважається, що на колесах рухомого складу нерівностей немає, тобто при розрахунках приймається сила $P_{\text{кол}} = 0$.

Приймається, що геометрична нерівність на поверхні кочення рейки має найбільш несприятливу форму, коли вона (нерівність) окреслена кривою у вигляді косинусоїди, ординати якої визначаються за формулою

$$\eta = 0,5 e_{\text{нер}} [1 - \cos 2\pi (x / \ell_{\text{нер}})], \quad (1.2)$$

де $e_{\text{нер}}$, $\ell_{\text{нер}}$ – відповідно глибина та довжина нерівності;

x – відстань від початку нерівності до точки прикладання сили $P_{\text{верт}}$.

Окрім означених параметрів $e_{\text{нер}}$ і $\ell_{\text{нер}}$, геометрична нерівність на головці рейки характеризується уклоном, середнє значення якого знаходиться за формулою

$$i_{\text{нер}} = 2 e_{\text{нер}} / \ell_{\text{нер}}. \quad (1.3)$$

Найбільшу величину сили інерції необресореної маси екіпажа при проходженні колесом нерівності на рейці можна визначити таким чином:

$$P_{\text{нер}} = \pi^2 i_{\text{нер}} V (U_{\text{верт}} q_{\text{кол}} / k)^{0.5} / 2g, \quad (1.4)$$

де π , g – постійні величини (число « π »; прискорення сили ваги);

$U_{\text{верт}}$ – вертикальний модуль пружності підрейкової основи;

k – коефіцієнт відносної жорсткості основи і рейки;

$q_{\text{кол}}$ – необресорена маса екіпажа, що віднесена на одне колесо;

V – швидкість руху колеса по нерівності.

Нижче наводяться результати розрахунків величини динамічної сили $P_{\text{нер}}$ при проходженні вантажного (4-осьового) вагона по рейках з довгими нерівностями на поверхні кочення (таблиця 1.1). При цьому конструкція верхньої будови характеризується такими параметрами: рейки типу Р65; залізобетонні шпали; щебеневий баласт.

Таблиця 1.1 – Величина сили $P_{\text{нер}}$

Швидкість руху V , км/год	Величина сили $P_{\text{нер}}$, кН
30	3,50
50	6,05
70	8,90
100	13,80

Аналіз цих результатів показує, що (у цьому випадку) функція $P_{\text{нер}} = f(V)$ має лінійний характер і задовільно описується математичною моделлю

$$P_{\text{нер}} = 3,4 + 0,147 (V - 30). \quad (1.5)$$

За діючими правилами розрахункова величина сили $P_{\text{нер}}$ устанавлюється за формулою

$$P_{\text{верт}} = P_{\text{ст}} + 0,75P_{\text{рес}} + 2,5S, \quad (1.6)$$

де $P_{\text{ст}}$ – статичне навантаження колеса на рейку (для 4-осьового вантажного вагона $P_{\text{ст}}=116$ кН);

$P_{\text{рес}}$ – найбільше значення сили інерції при коливанні надресореної частини екіпажа;

S – середнє квадратичне відхилення сили $P_{\text{верт}}$.

У свою чергу параметри $P_{\text{рес}}$ та S визначаються (для прийнятих умов) за формулами:

$$P_{\text{рес}} = \mathcal{J}_{\text{рес}}Z_{\text{рес}}, \quad (1.7)$$

$$S = [(0,08 P_{\text{рес}})^2 + (0,707 P_{\text{нер}})^2]^{0,5}, \quad (1.8)$$

де $J_{\text{рес}}$ – жорсткість ресорного підвішування візка, що приведена до одного колеса (для 4-осьового вантажного вагона $J_{\text{рес}} = 2000$ кН/м);

$Z_{\text{рес}}$ – максимальний динамічний прогин ресор (для 4-осьового вантажного вагона $Z_{\text{рес}} = 0,01 + 16 \cdot 10^{-7} \cdot V^2$ м).

У таблиці 1.2 наводяться результати розрахунків величини сили $P_{\text{верт}}$, що виникає під час руху 4-осьового вантажного вагона по геометричній нерівності на головці рейки (характеристика колії: рейки типу Р65; залізобетонні шпали; щебеневий баласт; $U_{\text{верт}} = 70$ МПа; $k = 1,242$ 1/м).

Таблиця 1.2 – Значення сили $P_{\text{верт}}$ та функція $P_{\text{верт}} = f(V)$

Параметри нерівності			Значення сили $P_{\text{верт}}$, кН, при швидкості руху, км/год				Функція $P_{\text{верт}} = f(V)$
$\ell_{\text{нер}}$, мм	$e_{\text{нер}}$, мм	$i_{\text{нер}}$	30	50	70	100	
250	1	0,008	142	151	168	188	$P_{\text{верт}} = 142 + 0,657 (V - 30)$
500	1	0,004	139	146	161	171	$P_{\text{верт}} = 139 + 0,457 (V - 30)$
1000	1	0,002	138	144	151	167	$P_{\text{верт}} = 138 + 0,414 (V - 30)$
1000	0	0	138	143	150	165	$P_{\text{верт}} = 137 + 0,386 (V - 30)$

Аналіз наведених результатів свідчить, що (для прийнятих умов) функція $P_{\text{верт}} = f(V)$ має лінійний характер і відповідає математичній моделі виду $P_{\text{верт}} = A + B(V - 30)$, де A і B – емпіричні величини.

Геометричні нерівності на головці рейки (як джерело додаткових динамічних сил від коліс рухомого складу) сприяють інтенсифікації процесу накопичення розладів у конструкції колії.

Результати відповідних досліджень дали змогу встановити співвідношення інтенсивності накопичення залишкових деформацій колії залежно від параметра $i_{\text{нер}}$ (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Співвідношення інтенсивності накопичення деформацій

Уклон нерівності на поверхні кочення рейок $i_{\text{нер}}$	Співвідношення інтенсивності накопичення деформації для колії на залізобетонних шпалах
0	1,0
0,002	1,3
0,004	1,9
0,008	3,6

Таким чином, наявність нерівностей на поверхні кочення рейок зумовлює підвищення витрат на технічне обслуговування конструкції ЗК у процесі її експлуатації.

Для оздоровлення поверхні кочення рейок (за рахунок зменшення глибини геометричних нерівностей на головці рейок або повного їх усунення) застосовується їх профільне шліфування. Виконання цієї ремонтно-колійної роботи забезпечує рівномірність та зниження рівня динамічних сил, що діють на елементи конструкції ЗК. У свою чергу це сприяє продовженню строку служби елементів конструкції ЗК та скороченню потреби у виправленні колії у плані та профілі.

У таблиці 1.4 наводяться дані щодо глибини нерівності на головці рейок, при перевищенні якої призначається профільне шліфування рейок.

Таблиця 1.4. – Глибина нерівності при встановленій швидкості руху

Вид нерівностей	Глибина нерівності, мм, при встановленій швидкості руху, км/год		
	до 60	61–100	101–140
Короткі	0,08	0,06	0,05

Середні та довгі	0,8	0,7	0,6
------------------	-----	-----	-----

Контактуючі поверхні системи «колесо-рейка» не є ідеальними, вони мають певні нерівності, які є джерелом появи додаткових динамічних сил при взаємодії складових означеної системи.

Нижче розглядається ситуація, коли на бандажі коліс рухомого складу немає пошкоджень, а на поверхні кочення рейок є такі геометричні нерівності, як хвилеподібний знос – деформація головки рейки довжиною 0,25–1,5 м (код дефекту 40), рифлі – короткі 0,03–0,12 м хвилеподібні нерівності (код дефекту 49), а також (для рейкових плітей) сідловина (місцеве зім'яття довжиною до 0,2 м) у зварному стику (код дефекту 46).

Діючі нормативи при наявності на рейках указаних дефектів визначають допустиму швидкість руху пасажирських поїздів $V_{\text{доп}}$ (таблиця 1.5).

Таблиця 1.5 – Параметр $e_{\text{нер}}$ і значення $V_{\text{доп}}$.

Глибина нерівності на головці рейки $e_{\text{нер}}$, мм, за дефектами		$V_{\text{доп}}$, км/год
код 40 і 49	код 46	
1,0	1,0	121–140
1,5	2,0	101–120
2,0	2,0	71–100
3,0	3,0	До 70

Примітки:
1 Величина $e_{\text{нер}}$ вимірюється на базі 1 м.
2 При перевищенні $e_{\text{нер}}$ вказаної у таблиці величини рейок, що експлуатуються у головній колії, вони належать до рангу дефектних

Видно, що при встановленні рівня $V_{\text{доп}}$ урахується лише $e_{\text{нер}}$, а інші параметри нерівності (її довжина $l_{\text{нер}}$ та уклон $i_{\text{нер}} = 2e_{\text{нер}}/l_{\text{нер}}$) до уваги не беруться. Хоча, як буде показано нижче, ці параметри

суттєво впливають на показники динамічної взаємодії системи «колесо–рейка»).

При русі екіпажа по колії (з вертикальними нерівностями на головці) між колесом та рейкою виникає реакція взаємодії $P_{вз}$, яка складається з двох сил: статичної (навантаження на колесо) $P_{ст}$ й динамічної $P_{дин}$, що з'являється через наявність геометричної нерівності на поверхні кочення рейки:

$$P_{вз} = P_{ст} + P_{дин}. \quad (1.9)$$

Рівняння (1.9) можна подати у безрозмірному вигляді:

$$k_{вз} = 1 + k_{дин}, \quad (1.10)$$

де $k_{вз} = P_{вз} / P_{ст}$; $k_{дин} = P_{дин} / P_{ст}$.

Динамічна складова $k_{дин}$ реакції взаємодії $k_{вз}$ визначає додаткові динамічні сили у зоні контакту колеса з рейкою й (за інших рівних умов) залежить від параметрів нерівності та швидкості руху. Експериментальними дослідженнями встановлено, що при русі з однаковими швидкостями по хвилеподібних нерівностях рівної довжини величина додаткових динамічних сил практично прямо пропорційна параметру $e_{нер}$.

З достатнім ступенем точності оцінити додаткові динамічні сили, що виникають у системі «колесо–рейка» при наявності на останній нерівності, можна за формулою

$$k_{дин} = 0,000085 (e_{нер} / l_{нер})V^2, \quad (1.11)$$

де прийнята така розмірність складових: $e_{нер}$ – мм; $l_{нер}$ – м; V – км/год.

Аналіз залежності (1.11) показує, що рівень реакції взаємодії $k_{вз}$ визначається не тільки глибиною нерівностей $e_{нер}$, а й їх довжиною $l_{нер}$.

З погляду динамічної взаємодії колії та рухомого складу найбільш доцільним критерієм оцінки геометричних нерівностей на поверхні головки рейок є їх уклон $i_{нер}$, який одночасно поєднує параметри $e_{нер}$ і $l_{нер}$.

Безвідривне і, як наслідок, безударне кочення колеса по рейці забезпечується за умови, коли $k_{\text{дин}} \leq 1,2$. З огляду на цю умову, можна визначити допустимі значення параметрів $\ell_{\text{нер}}$ і $i_{\text{нер}}$ для ділянок колії з відповідним рівнем установленної швидкості руху $V_{\text{вст}}$ пасажирських поїздів (таблиця 1.6). При цьому значення $i_{\text{нер}}$ знаходилося з рівняння

$$1,2 = 0,0000425 (2e_{\text{нер}} / \ell_{\text{нер}}) V^2. \quad (1.12)$$

Таблиця 1.6 – Допустимі (при $k_{\text{дин}} = 1,2$) параметри нерівностей рейок

Допустимі параметри нерівності головки рейок			$V_{\text{доп}}$, км/год
$e_{\text{нер}}$, мм	$\ell_{\text{нер}}$, м	$i_{\text{нер}}$, ‰	
1,0	1,40	1,44	140
	1,05	1,93	121
1,5	1,53	1,96	120
	1,08	2,77	101
2,0	1,42	2,82	100
	0,71	5,60	71
3,0	1,04	5,76	70

Таким чином, реалізація допустимої швидкості руху поїздів (за діючими нормативами) по рейках з геометричними нерівностями (вище означених видів) на поверхні їх кочення можлива (без перевищення $k_{\text{дин}}=1,2$) за умови, коли довжина нерівностей не менша від указаних значень у таблиці 1.6.

У таблиці 1.7 наведені, з огляду на умову $k_{\text{дин}} \leq 1,2$, допустимі параметри хвилеподібних нерівностей на головці рейок для певних діапазонів $V_{\text{вст}}$.

Строк служби рейкових плітей безстикової колії безпосередньо визначає тривалість «життєвого» циклу конструкції ВБК в цілому. Так, на поточний час нормативний строк служби рейкових плітей, що зварені з нових термозміцнених рейок типу Р65, обмежується у напрацьованому тоннажі 800 млн т бруто.

Таблиця 1.7 – Допустимі параметри $[e_{\text{нер}}]$, $[\ell_{\text{нер}}]$, $[i_{\text{нер}}]$ і $V_{\text{вст}}$

$V_{\text{вст}}$, км/год	$[i_{\text{нер}}]$, ‰	Значення $[e_{\text{нер}}]$, мм, при $\ell_{\text{нер}}$, м								
		1,50	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	0,10	0,05	0,025
141– 160	1,0	0,75	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,03	0,01
121– 140	1,5	1,10	0,75	0,60	0,45	0,30	0,15	0,07	0,04	0,01
101– 120	2,0	1,50	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	0,10	0,05	0,02
81– 100	3,0	2,30	1,50	1,20	0,90	0,60	0,30	0,15	0,07	0,03
61– 80	4,0	3,00	2,00	1,60	1,20	0,80	0,40	0,20	0,10	0,04

Планується довести строк служби рейкових плітей, які експлуатуються на основних напрямках залізниць, до тоннажу у 1,1 млрд т бруто, що дасть змогу скоротити річні обсяги з модернізації колії й капітальні вкладення на її виконання приблизно на 30–35 %.

У системі ведення рейкового господарства як одне з пріоритетних напрямків розглядається профільне шліфування рейок (ПШР). Ця ремонтно-колійна робота виконується для оздоровлення поверхні кочення рейок (за рахунок зменшення геометричних нерівностей на головці рейок або повної їх ліквідації) та відновлення робочого профілю головки рейок шляхом зняття поверхневого (перенаклепаного) шару металу на ній (на головці). При цьому змінюються певні параметри технічного стану рейок, поліпшуються умови їх взаємодії з колесами рухомого складу, забезпечуються більша рівномірність і зниження рівня динамічних сил, що діють на елементи конструкції колії.

Зростання (при напрацюванні тоннажу) коротких нерівностей на головці рейок до певних значень призводить до підвищення

величини означених сил ($P_{\text{верт}}$ та $P_{\text{нер}}$). При цьому погіршуються умови взаємодії рухомого складу та колії, ускладнюється робота елементів верхньої будови і, як наслідок, у ряді випадків виникає необхідність обмеження (на конкретній ділянці) швидкості руху поїздів (таблиця 1.8).

У процесі експлуатації при напрацюванні тоннажу T геометричні нерівності на поверхні кочення рейок розвиваються. Зміна їх глибини (параметр $e_{\text{нер}}$) описується відповідною криволінійною залежністю, яка у цьому випадку замінюється на ламану з прямолінійними елементами (таблиця 1.9).

Таблиця 1.8 – Допустима швидкість руху

Глибина коротких нерівностей $e_{\text{нер}}$, мм	Допустима швидкість руху, км/ год
$0,5 < e_{\text{нер}} \leq 1,0$	140
$1,0 < e_{\text{нер}} \leq 2,0$	120
$2,0 < e_{\text{нер}} \leq 4,0$	80
$4,0 < e_{\text{нер}} \leq 8,0$	60
$e_{\text{нер}} > 8,0$	40

Таблиця 1.9 – Залежність $e_{\text{нер}} = f(T)$

Діапазон T , млн т бруто	Залежність $e_{\text{нер}} = f(T)$, мм
0–175	$e_{\text{нер}} = 0,5 + 0,0013T$
175–300	$e_{\text{нер}} = 0,72 + 0,0022(T-175)$
300–400	$e_{\text{нер}} = 1,0 + 0,0050(T-300)$
400–525	$e_{\text{нер}} = 1,5 + 0,0064(T-400)$

Для конкретної ділянки колії з певними експлуатаційними умовами можна встановити необхідну періодичність виконання ПШР (у межах «життєвого» циклу верхньої будови колії) й скорегувати міжремонтну схему (для цієї ділянки колії).

Розглянемо такий приклад: на ділянці експлуатується конструкція безстикової колії (БК); швидкість руху поїздів 100 км/год; міжремонтна схема (для цієї ділянки) така:

М-В-В-КОР-С-В-ПС-В-КОР-В-М,

де М – модернізація колії; ПС, С, КОР – відповідно посилений середній, середній, комплексно-оздоровчий ремонт колії; В – виправлення колії із використанням машинних комплексів.

Між суміжними модернізаціями $T = 1100$ млн т бруто, а регламентні (згідно з міжремонтною схемою) ремонтно-коліїні роботи виконуються після напрацювання 110 млн т бруто.

На цій ділянці параметр $e_{\text{пер}}$ не повинен перевищувати 1 мм, тобто ПШР повинне призначатися до виконання після пропуску кожних 300 млн т бруто.

Таким чином, у цьому випадку міжремонтна схема набуває такого вигляду:

М-В-В-КОР+ПШР-С-В-ПС+ПШР-В-КОР-В+ПШР-М.

2 Управління строком служби рейкових плітей за рахунок збільшення їх довжини

Конструктивно верхня будова безстикової колії монтується з рейко-шпальної решітки (РШР) та підшпальної основи (баластовий шар). Основним елементом, який сприймає динамічне навантаження від коліс рухомого складу, а потім передає це навантаження на інші елементи верхньої будови (ВБК), є рейкові пліті, і, як наслідок, динамічні напруження, що виникають у рейкових плітях під поїзним навантаженням переважно визначають ступінь напружень, які з'являються в інших елементах ВБК.

Головним недоліком конструкції БК є наявність зон зрівнювальних прольотів між суміжними рейковими плітями. У цих зонах спостерігається підвищений рівень динамічної взаємодії коліс рухомого складу та колії і, як наслідок, – інтенсивний вихід елементів ВБК за дефектами. Саме на ці ділянки БК припадає 70–80 % загальних витрат, що пов'язані з утриманням конструкції ВБК у справному стані.

Означена особливість конструкції БК (наявність зон зрівнювальних прольотів і наявність стикових з'єднань рейок)

зумовлює зниження експлуатаційної надійності елементів РШР, що у свою чергу негативно впливає на ефективність роботи конструкції БК в цілому при напрацюванні тоннажу.

Установлені функціональні залежності виходу елементів конструкції БК у дефектні від обсягу напрацьованого тоннажу T , млн т бруто. У таблиці 2.1 наведені математичні моделі, які характеризують сумарний поодинокий вихід рейок у дефектні під час експлуатації БК (рейкові пліти довжиною $l_{пл} = 650$ м зварені з термозміцнених рейок типу Р65; залізобетонні шпали; щебенекий баласт; швидкість руху поїздів $V = 100$ км/год; середнє осьове навантаження $P_{ос} = 155$ кН).

Таблиця 2.1 – Залежність $\gamma_{рейок} = f(T)$

Показник	Математична модель залежності $\gamma_{рейок} = f(T)$	
	зона середньої частини рейкових плітей	зона зрівнювальних прольотів
Сумарний поодинокий вихід у дефектні термозміцненіх рейок типу Р65, шт/км	$\gamma_{рейок} = 0,56 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$ (2.1)	$\gamma_{рейок} = 5,5 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$ (2.2)

Видно, що інтенсивність появи дефектних рейок у зоні зрівнювальних прольотів значно вища (у цьому випадку в 10 разів) порівняно із середньою частиною рейкових плітей (без урахування їх температурно-рухомих кінців). Тому ліквідація цих зон є діючим заходом підвищення довговічності рейкових плітей БК у процесі експлуатації.

У таблиці 2.2 наведені результати розрахунків з визначення інтенсивності ураження рейок дефектами для конструкції БК з плітями різної довжини.

Таблиця 2.2 – Залежність $\gamma_{\text{рейок}} = f(T)$

Довжина, м		Функціональна залежність $\gamma_{\text{рейок}} = f(T)$, шт/км
рейкової пліті	в т.ч. її середньої частини на 1 км БК	
650	845	$\gamma_{\text{рейок}} = 1,33 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$ (2.3)
1250	930	$\gamma_{\text{рейок}} = 0,91 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$ (2.4)
2450	964	$\gamma_{\text{рейок}} = 0,74 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$ (2.5)
4250	980	$\gamma_{\text{рейок}} = 0,66 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$ (2.6)

Аналіз отриманих результатів свідчить, що при збільшенні довжини рейкових плітей БК спостерігається певне зниження параметра $\gamma_{\text{рейок}}$ при напрацюванні тоннажу. Зміна величини цього параметра відбувається за деякою криволінійною залежністю й при $l_{\text{пл}} > 4500$ м його значення наближається до 0,65 шт. на 1 км після пропуску 1 млн т бруто вантажу.

Таким чином, шляхом ліквідування зон зрівнювальних прольотів (як наслідок, скорочення температурно-рухомих кінців рейкових плітей) і доведення довжини останніх (плітей) до 4,5 км та більше можна удвічі знизити інтенсивність появи дефектних рейок (на 1 км колії) у процесі експлуатації БК. А це у свою чергу позитивно вплине на довговічність рейкових плітей та інших елементів ВБК.

На головних коліях I–IV категорій «життєвий» цикл конструкції БК (і відповідно строк служби рейкових плітей) обмежується напрацюванням 800 млн т бруто вантажу. При цьому, як додатковий критерій, ураховується допустимий сумарний вихід рейок за дефектністю $[\gamma_{\text{рейок}}]$ на 1 км колії за весь період експлуатації. Для конструкції БК на ділянках означених категорій цей показник становить $[\gamma_{\text{рейок}}] = 10$ шт/км.

Якщо взяти за основу вказане значення $[\gamma_{\text{рейок}}]$, можна визначити (за формулами з таблиці 2.2) прогностичний строк служби $T_{\text{прог}}$ рейкових плітей різної довжини (таблиця 2.3) для прийнятих експлуатаційних умов (V ; $P_{\text{ос}}$).

Таблиця 2.3 – Прогнозний строк служби рейкових плітей

$l_{пл}, м$	$T_{прог}, млн т брутто$
650	920
1250	1030
2450	1110
4250	1150

Видно, що функція $T_{прог} = f(l_{пл})$ відповідає криволінійній залежності, яка має зростаючий характер з асимптотою на рівні 1,2 млрд т брутто.

Таким чином, задача з підвищення «життєвого» циклу рейкових плітей до 1,1 млрд т брутто може бути (певною мірою) досягнута шляхом збільшення їх (плітей) довжини (не менш ніж 2,5 км) з ліквідуванням відповідних зон зрівнювальних прольотів.

Останнім часом у рамках системи ведення рейкового господарства як один з пріоритетних напрямків розглядається профільне шліфування рейок.

У процесі експлуатації при напрацюванні тоннажу T геометричні нерівності на поверхні кочення рейок розвиваються. Зміна (приріст) їх глибини (параметр $\Delta e_{нер}$) залежить від вантажнапруженості дільниці Γ , млн ткм брутто на 1 км колії за рік, V , км/год та T , млн т брутто, й відповідає (для термозміцнених рейок типу Р65) математичні моделі

$$\Delta e_{нер} = (0,87 \cdot 10^{-5} \cdot V + 0,54 \cdot 10^{-6} \cdot \Gamma - 1,25 \cdot 10^{-4}) \Delta T, \quad (2.7)$$

де ΔT – пропущений тоннаж (при зростанні глибини нерівності від $e_{нер1}$ до $e_{нер2}$).

Область застосування формули (2.7): $V > 25$ км/год; $\Gamma > 10$ млн ткм брутто/км за рік.

У таблиці 2.4 наведені результати розрахунків величини $\Delta e_{нер}$ залежно від параметра ΔT (для діапазону $\Gamma = 10 - 40$ млн ткм брутто/км за рік та $V = 100$ км/год).

Таблиця 2.4 – Значення $\Delta e_{\text{нер}}$ при ΔT

Г	Значення $\Delta e_{\text{нер}}$, мм, при ΔT , млн т бруто									
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
10	0,19	0,38	0,56	0,75	0,94	1,13	1,31	1,50	1,69	1,88
20	0,19	0,38	0,57	0,76	0,94	1,13	1,32	1,52	1,70	1,89
30	0,19	0,38	0,57	0,76	0,95	1,14	1,33	1,52	1,71	1,90
40	0,19	0,38	0,57	0,76	0,96	1,15	1,34	1,53	1,72	1,92

Математична обробка даних у таблиці 2.4 дала змогу встановити функціональну залежність $\Delta e_{\text{нер}} = f(\Delta T)$, яка має лінійний характер та описується формулою (з областю застосування $\Delta T = 25 - 250$ млн т бруто)

$$\Delta e_{\text{нер}} = 0,19 + \mathbf{b} (\Delta T - 25), \quad (2.8)$$

де \mathbf{b} – коефіцієнт пропорційності, значення якого залежить від Γ та V (таблиц 2.5).

Таблиця 2.5 – Значення коефіцієнта \mathbf{b}

V , км/год	Γ , млн ткм бруто/км за рік	Значення коефіцієнта \mathbf{b}
100	10	0,00751
	20	0,00756
	30	0,00760
	40	0,00769

Для конкретної ділянки колії з певними експлуатаційними умовами можна встановити необхідну періодичність виконання ПШР (у межах «життєвого» циклу ВБК) і скорегувати міжремонтну схему (для цієї ділянки колії).

Так, наприклад, на ділянці колії (з $\Gamma = 30$ млн ткм бруто/км за рік; $V=100$ км/год) початкове значення параметра $e_{\text{нер}}$ становить 0,3 мм. На цій ділянці геометричні нерівності на головці рейкових

плітей не повинні по глибині перевищувати 1 мм. За даними таблиці 2.4 параметр $e_{\text{нер}} = 1\text{мм}$ слід очікувати після напрацювання 100 млн т бруто тоннажу, тобто у цьому випадку роботи з ПШР необхідно призначати до виконання через кожні три роки експлуатації конструкції БК.

Набутий досвід свідчить, що періодичне шліфування рейкових плітей сприяє збільшенню строку їх служби (та інших елементів ВБК) в 1,5–2 рази. Це підтверджує ефективність ПШР як заходу з підвищення довговічності рейкових плітей та їх «життєвого» циклу.

Якщо розглянути «умовний» кілометр безстикової колії, то частка, %/км, зони зрівнювальних прольотів $k_{\text{зрів}}$ становить

$$k_{\text{зрів}} = 100 - L_{\text{пл}} / (1,34 + 0,01L_{\text{пл}}), \quad (2.9)$$

де $L_{\text{пл}}$ – проектна довжина рейкової пліті, м;

$L_{\text{пл}} / (1,34 + 0,01L_{\text{пл}}) = k_{\text{сер}}$ – відсоток середньої (умовно температурно-нерухомої) частини рейкової пліті, %/км.

Основним конструктивним елементом, що визначає строк служби ВБК, є рейкові пліті. Для рейкових плітей, що зварені з рейок типу Р65, діючими нормативними документами встановлено граничний обсяг напрацьованого тоннажу у $T_{\text{гран}} = 800$ млн т бруто.

Прийнявши це значення T як строк експлуатації рейкошпальної решітки, можна встановити відповідні математичні моделі виду $\gamma_i = f(T)$ для безстикової колії з рейковими плітями різної довжини. При цьому вважається, що для i -го елемента

$$\gamma_i = k_{\text{зрів}} \gamma_{i-\text{зрів}} + k_{\text{сер}} \gamma_{i-\text{сер}}. \quad (2.10)$$

Якщо прийняти за $A = 0,01 L_{\text{пл}} / (1,34 + 0,01L_{\text{пл}})$, то розрахункова формула для визначення $\gamma_i = f(T, L_{\text{пл}})$ матиме такий вигляд:

$$\gamma_i = \gamma_{i-\text{зрів}} - A (\gamma_{i-\text{зрів}} + \gamma_{i-\text{сер}}). \quad (2.11)$$

У таблиці 2.6 наведені результати аналітичного розрахунку параметра γ_i залежно від $L_{\text{пл}}$ (для базової конструкції рейкошпальної решітки).

Таблиця 2.6 – Значення γ_i при $L_{пл}$

Елемент РШР	Значення γ_i при $L_{пл}$ ($T = 800$ млн т)					Співвідношення
	650 м	1000 м	1500 м	2000 м	2500 м	
Сумарний поодинокий вихід у дефект-ні рейок типу Р65, шт/км, з термічним зміцненням	7,19	5,85	4,94	4,46	4,16	1:0,81:0,69:0,62:0,58
Вихід за дефек-тами металевих підкладок скріплення типу КБ, % / км	57,32	57,01	56,80	56,69	56,62	1:0,99:0,99:0,99:0,99
Сумарний вихід залізобетонних шпал за дефектами, шт/км	0,94	0,87	0,78	0,75	0,73	1:0,93:0,84:0,80:0,78

3 Управління технічним станом колії через підсилення її підшпальної основи

Конструкція колії складається з рейко-шпальної решітки та підшпальної основи (ПО). Остання містить баластовий шар (БШ) та певну (робочу) зону земляного полотна, до якого належить його верхня частина, що безпосередньо сприймає навантаження від верхньої будови колії та рухомого складу (РС).

Значною мірою технічний стан ВБК (на певній ділянці) зумовлюється існуючими відхиленнями у параметрах геометрії рейкової колії, стабільність якої напряму залежить від показників деформативності ПО.

Конструкція ПО в процесі експлуатації працює у складних умовах, сприймаючи вібродинамічну дію РС та сезонні зміни агрегатного стану (під час періодичного промерзання та відтавання). Це призводить до розповсюдження (на мережі залізниць) таких дефектів і деформацій, як виплески БШ та баластові заглиблення у зоні основної площадки земляного полотна (корита, мішки, гнізда, ложі).

Проблема забезпечення стабільності ПО стає особливо гострою на лініях, де передбачається введення прискореного пасажирського руху або підвищення осьових навантажень у вантажному русі.

До критеріїв надійної ПО належать показники її деформативності: пружні осідання або модулі деформації.

За діючою методикою при оцінці напружено-деформованого стану ВБК рейка «розглядається як балка нескінченної довжини..., що вільно лежить на суцільній рівнопружній основі...».

При цьому пружний прогин рейки (осідання колії) у під дією системи вертикальних сил від коліс РС визначається за формулою

$$y = 0,5kP_{\text{екв}} / U_{\text{верт}}, \quad (3.1)$$

де $P_{\text{екв}}$ – еквівалентне навантаження, що передається на рейку від РС;

k – коефіцієнт відносної жорсткості основи і рейки;

$U_{\text{верт}}$ – вертикальний модуль пружності підрейкової основи.

Підрейкова основа конструкції ЗК розглядається як складна система, що містить проміжні скріплення, шпали, баластну призму та земляне полотно, робоча зона якого може налічувати декілька шарів. Тому фізичну модель конструкції ЗК можна подати як балку, що вільно лежить на багат шаровій основі.

Кожний ґрунтовий шар характеризується модулем деформації, товщиною й відповідним осіданням. Тоді осідання рейки можна подати як суму пружних осідань усіх шарів

$$y = y_{\text{скр}} + y_{\text{бал}} + y_{\text{зш}} + y_{\text{гр}}, \quad (3.2)$$

де y у правій частині міститься сума пружних осідань відповідно проміжного скріплення, БШ, захисного підбаластового шару (ЗШ) і ґрунту робочої зони земляного полотна (ЗП).

Пружне осідання баласту можна визначити за формулою

$$y_{\text{бал}} = \sigma_{\text{бал}} h_{\text{бал}} / E_{\text{бал}}, \quad (3.3)$$

де $\sigma_{\text{бал}}$ – напруження у баласті під шпалою;

$h_{\text{бал}}$ – товщина БШ;

$E_{\text{бал}}$ – модуль деформації баласту на рівні нижньої постелі шпали.

У свою чергу значення $\sigma_{\text{бал}}$ встановлюється за формулою

$$\sigma_{\text{бал}} = 2 Q_{\text{дин}} / ab\alpha, \quad (3.4)$$

де a , b – довжина шпали та ширина її нижньої постелі;

α – коефіцієнт, що враховує вигин шпали під силою $Q_{\text{дин}}$;

$Q_{\text{дин}}$ – динамічна сила, що діє на рейку;

$$Q_{\text{дин}} = 0,5 kl_{\text{шп}} P_{\text{екв}}, \quad (3.5)$$

де $l_{\text{шп}}$ – відстань між осями шпал.

Пружне осідання ЗШ визначається за формулою

$$y_{\text{зш}} = \sigma_{\text{зш}} h_{\text{зш}} / E_{\text{зш}}, \quad (3.6)$$

де $\sigma_{\text{зш}}$ – напруження на верхній границі ЗШ;

$h_{\text{зш}}$ – товщина ЗШ;

$E_{\text{зш}}$ – модуль деформації на поверхні ЗШ.

Осідання ґрунту робочої зони ЗП може бути встановлено за формулою

$$y_{\text{гр}} = 2nr\sigma_{\text{гр}} (1-\mu^2) / E_{\text{гр}}, \quad (3.7)$$

де n – коефіцієнт штампа;

r – приведений радіус штампа;

μ – коефіцієнт Пуассона ґрунту робочої зони ЗП;

$\sigma_{гр}$ – напруження на верхній границі ґрунту ЗП;

$E_{гр}$ – модуль деформації ґрунту робочої зони ЗП.

Таким чином, вище наведені формули дають змогу, знаючи навантаження на колію та модулі її деформації, визначити величину осідання рейки.

Нижче наводяться результати відповідних розрахунків з установлення нормативів (допустимих) осідань ПО (при різних модулях деформації БШ на рівні нижньої постелі шпали) для безстикової конструкції колії на залізобетонних шпалах при її діагностуванні мобільним комплексом типу СПМ-18 (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Нормативні значення осідання ПО

Категорія колії	Стан ВБК	Норми осідання $u_{бал}$, мм
Швидкісна, I–II	Після ремонту	0,7
	Перед ремонтом	0,8
III–IV	Після ремонту	0,7
	Перед ремонтом	0,9

Ці нормативи відповідають параметрам стабільного ПО й можуть бути застосовані при оцінці якості технічного стану ВБК (на певній ділянці).

Якщо фактичні значення $u_{бал}$ (за показниками діагностичного комплексу СПМ-18) перевищують нормативні, підсилення несучої здатності ПО може бути досягнуто за рахунок укладання у БШ геоматеріалів (геотекстиль, геосітка тощо). Практичний досвід показав, що реалізація такого заходу:

- знижує інтенсивність накопичення залишкових деформацій у шарах ПО, які розміщені нижче від геоматеріалу;

- запобігає забрудненню щебеневого баласту глинистими частками ґрунтів основної площадки ЗП;
- уповільнює процес появи виплесків БШ;
- зменшує кількість розладів у геометрії рейкової колії.

Усе це, як наслідок, сприяє зниженню трудових витрат на поточне утримання колії. При укладанні геотекстилю норма витрат праці (на ділянці з вантажонапруженістю 25 млн ткм бруто/км за рік) зменшується на 0,159 монтера колії на 1 км за рік.

Стабільність рейкової колії в процесі експлуатації конструкції ЗК здебільшого визначається якістю основної площадки, на дефекти й деформації якої припадає понад 40 % усіх пошкоджень ЗП.

Одним з ефективних заходів підсилення основної площадки є улаштування захисних шарів, які мають підвищені міцнісні та деформаційні властивості.

Захисний шар, що укладається під щебенеvu баластну призму, повинен виконувати ряд функцій:

- розподіляти й знижувати поїзне навантаження на ґрунти ЗП;
- відводити атмосферні води, які потрапляють на ВБК;
- запобігати проникненню та перемішуванню часток БШ і ґрунтів ЗП;
- захищати від промерзання ґрунтів, які схильні до обдимання;
- забезпечувати гасіння коливань, що виникають при проходженні поїздів.

ЗШ виконується із щебенево-гравійно-піщаної суміші і, якщо є потреба, доповнюється геосинтетичними матеріалами (геотекстиль, геосітка, георешітка). Товщина ЗШ і потреба застосування геосинтетиків визначається, зокрема, з умови забезпечення відповідного модуля деформації ґрунтів ЗП (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Товщина ЗШ для колії різної категорії.

Категорія колії	Вимоги		Товщина ЗШ, м		
	модуль деформації не менш, МПа	коефіцієнт ущільнення не менш	без армування	армування георешітками	
				в один шар	у два шари

Швидкісн а	80	1,00	0,3–1,0	0,2–0,75	0,2–0,5
I-II	60	0,98	0,2–0,8	0,2–0,65	0,2–0,4
III	50	0,95	0,2–0,6	0,2–0,45	0,2–0,3

Ефект від застосування ЗШ досягається за рахунок підвищення сталості основної площадки ЗП. У результаті стабілізується геометрія рейкової колії, у три рази збільшується періодичність між проведенням виправних робіт, зростає строк служби інших елементів ВБК.

4 Управління технічним станом конструкції ВБК

На перспективу визначене завдання підвищення ресурсу ВБК (тобто строку служби рейко-шпальної решітки до її заміни) до 1,5 млрд т брутто, що дасть змогу зменшити вартість «життєвого» циклу конструкції колії в 1,2 рази.

Реалізація цього завдання базується на впровадженні комплексу заходів, які спрямовані на створення рівноресурсної конструкції ВБК.

Конструкція ВБК складається з рейко-шпальної решітки та підшпальної основи (баластового шару). Елементи верхньої будови виготовляються з неоднорідних (за фізико-механічними властивостями) матеріалів і мають певний технічний ресурс.

Так, на сучасний момент існує така оцінка технічного ресурсу основних елементів верхньої будови конструкції ВК на ділянках із середніми умовами експлуатації:

- рейкові пліти (зварені з рейок типу Р65) – $T_{\text{рейок}} = 800$ млн т брутто;

- вузол проміжного скріплення (типу КБ) – цей елемент ВБК конструктивно складається з деталей, які мають фізико-механічні характеристики різного рівня; строк служби вузла проміжного скріплення цього типу становить приблизно $T_{\text{скр}} = 350$ млн т брутто;

- залізобетонні шпали (під проміжне скріплення типу КБ) – надійна експлуатація залізобетонних шпал можлива до напрацювання 1,4–1,6 млрд т брутто ($T_{\text{шп}} = 1500$ млн т брутто);

- щебеневий баласт – до показників, які характеризують граничний стан баластового шару, належать: ступінь (рівень) забрудненості щебеневого баласту й протяжність виплесків баласту на 1 км колії; за першим критерієм строк служби БШ обмежується пропуском 700 млн т брутто, а гранична кількість виплесків очікується після напрацювання 400 млн т брутто, тобто $T_{\text{бал}} = 400$ млн т брутто.

Проблема рівноресурсності основних елементів ВБК містить своєрідний кількісний аспект. Потрібно не тільки підвищити строки служби окремих елементів конструкції колії, а й збалансувати їх (ці строки).

За браком методики наукового обґрунтування відмінностей ресурсів роботи основних елементів ВБК пропонується підхід, який забезпечує отримання потрібних вихідних співвідношень і дає змогу орієнтуватися на ці співвідношення на другому етапі вирішення проблеми рівноресурсності.

Основним елементом ВБК є рейки. Саме їх ресурс визначає строк служби конструкції верхньої будови (на певній ділянці). З огляду на це, на сучасний момент існує таке співвідношення ресурсів її елементів:

$$T_{\text{рейок}} / T_{\text{рейок}} : T_{\text{скр}} / T_{\text{рейок}} : T_{\text{шп}} / T_{\text{рейок}} : T_{\text{бал}} / T_{\text{рейок}} = 1:0,44:1,88:0,50.$$

Видно, що лімітуючими елементами конструкції є проміжні скріплення та БШ, ресурс яких практично удвічі менший, ніж у рейкових плітей.

Безумовно, збільшення технічного ресурсу вказаних елементів ВБК можливе за рахунок підвищення їх якості (міцнісних характеристик) на стадії виготовлення, але цей захід у сучасних умовах (з відомих причин) реалізувати нереально.

Для забезпечення рівноресурсності елементів ВБК протягом її «життєвого» циклу необхідно передбачити у системі технічного обслуговування конструкції виконання на ділянці ремонтно-

колійної роботи певного виду: у цьому разі це середній ремонт колії з підвищеним обсягом заміни дефектних елементів проміжного скріплення після напрацювання конструкцією 400 млн т бруто.

Основними факторами, які визначають строк служби рейок, є якість рейкової сталі, якість виготовлення рейок, умови їх експлуатації (у тому числі рівень динамічної дії на конструкцію ВБК рухомого складу), система ведення рейкового господарства. Три перших фактори не підлягають управлінню (з боку служби колії).

Забезпечення у перспективі експлуатаційного ресурсу рейок у 1,5 млрд т бруто бачиться на шляху удосконалення системи ведення рейкового господарства, у першу чергу через організацію й упровадження правильної системи профільного шліфування рейок, що розміщені у колії, протягом їх «життєвого» циклу. У поточний час значна частка контактно-утомних дефектів у головці рейок зароджується від поверхні кочення. Для запобігання появі й розвитку таких дефектів слід регламентувати не тільки кількість проходів рейко-шліфувального поїзда, а й величину зняття металу залежно від умов експлуатації.

Якщо $T_{\text{рейок}} = 1500$ млн т бруто, то існує таке наступне співвідношення ресурсів елементів ВБК:

$$T_{\text{рейок}} / T_{\text{рейок}} : T_{\text{скр}} / T_{\text{рейок}} : T_{\text{шп}} / T_{\text{рейок}} : T_{\text{бал}} / T_{\text{рейок}} = 1:0,23:1:0,27.$$

Як і у попередньому випадку, лімітуючими (за технічним ресурсом) елементами конструкції ВБК є проміжні скріплення та БШ, строк служби яких майже у чотири рази менший, ніж у рейкових плітей та залізобетонних шпал.

Тут треба відмітити таке:

- підвищення строку служби рейкових плітей (до 1,5 млрд т бруто) передбачається за рахунок включення робіт з ПШР у міжремонтну схему (конкретної ділянки залізниці);

- забезпечення рівноресурсності елементів ВБК протягом її «життєвого» циклу необхідно передбачити у системі технічного обслуговування конструкції виконання на ділянці (після напрацювання 400, 800 і 1200 млн т бруто) середнього ремонту

колії із збільшеним обсягом заміни дефектних елементів проміжного скріплення.

Список літератури

1 Управління колійним господарством залізниць [Текст] : підручник / В. М. Астахов [та ін.]. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – 210 с.

2 Штомпель, А. М. Управління технічним станом залізничної колії через підсилення її підшпальної основи [Текст] / А. М. Штомпель, Т. Ю. Науменко // Сб. науч. тр. Sworld. – Иваново : Маркова А.Д., 2014. – Вып. 4(37), т. 17. – ЦИТ: 414–170. – С. 60–65.

3 Штомпель, А. М. Проблема рівноресурсності елементів верхньої будови безстикової колії [Текст] / А. М. Штомпель, О. О. Скорик, О. О. Овчинніков // Сб. науч. тр. Sworld. – Иваново : Маркова А.Д., 2014. – Вып. 3(36), т. 1. – ЦИТ: 314–256. – С. 64–69.

