

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.21.095:[624.072:539.319]

С. В. КЛЮЧНИК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

### Дослідження роботи вузла поверхового сполучення балок проїзної частини залізничного моста

**Мета.** Поверхове сполучення балок проїзної частини залізничних мостів найбільш просте за конструкцією, але внаслідок конструктивних недоліків виникають численні дефекти. Метою цієї роботи є дослідження пропонувані раніше способів підсилення вузла спирання балок проїзної частини поверхового сполучення, а також дослідження роботи запропонованого автором підсилення. **Методика.** Проаналізовано стан металевих мостів, експлуатованих на залізниці. Виявлено, що вирішальним елементом для визначення вантажопідйомності всього моста є балки проїзної частини. Для досягнення поставленої мети за допомогою методу скінченних елементів проведено аналіз напруженого стану вузла спирання поздовжньої балки на поперечну без підсилення та з підсиленням. Виявлено раціональні параметри запропонованого вузла підсилення. Розрахунки проведено в програмному забезпеченні «Selenia». **Результати.** Автор отримав і проаналізував деформаційно-напружений стан вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними за їх поверхового розташування, підібрав раціональні параметри елементів підсилення вузла спирання балок поверхового сполучення та проаналізував деформаційно-напружений стан нового вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними за їх поверхового розташування на основі типових прогонових споруд «Проектстальконструкції» (ПСК). Аналіз показує, що після запропонованого підсилення максимальні напруження в горизонтальних полицках поясних кутиків поздовжніх і поперечних балок, що руйнували конструкції, зменшились на 43–73 %. **Наукова новизна.** У роботі проведено аналіз напружено-деформованого стану металевих балок проїзної частини поверхового розташування з урахуванням спільної роботи балок із несучими фермами, а також досліджено напружено-деформований стан запропонованого підсилення вузла спирання металевих балок з виявленням раціональних параметрів. **Практична значимість.** Зазначений спосіб ремонту з підсиленням рекомендовано як найбільш раціональний для моста через річку Інгулець на 109-му км лінії Верхівцеве – Долинська (договір № 94/2011–Цтех–177/2011–ЦЮ від 30.09.2011). За поданими результатами було оформлено патент на корисну модель № 109806 від 12.09.2016.

*Ключові слова:* поздовжні балки; деформація; напруження; поперечні балки; металеві прогонові споруди

#### Вступ

Підвищення вантажопідйомності моста та подовження експлуатаційного ресурсу металевих прогонових споруд залізничних мостів, з урахуванням виявлених пошкоджень, можливі за умови усунення наявних дефектів утомного характеру, модернізації вузлів спирання поздовжніх балок мостового полотна на попе-

речні. Поверхове сполучення балок проїзної частини найбільш просте за конструкцією (рис. 1). Його застосовували у випадках, коли будівельна висота проїзної частини дозволяла встановити поздовжні балки на поперечні [1, 3].

Поперечні зв'язки поставлені тільки над опорами, тобто над поперечними балками. Ярусне розташування балок дозволило спростити їх поєднання. У місцях спирання поздов-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

жні балки прикріплені до поперечних болтами, причому отвори для болтів у поясах поздовжніх балок зроблені овальними, щоб створити можливість зрушення поздовжніх балок й усунути вигин поперечних балок у горизонтальній площині в разі деформації поясів. Тільки щодо середньої поперечної балки поздовжні балки жорстко прикріплені до розширених вузлових фасонів поздовжніх зв'язків і передають їм гальмівні сили. Завдяки поверховому розташуванню в поздовжніх балках скоротилося число монтажних стиків, які призначені через кожні дві панелі [1].

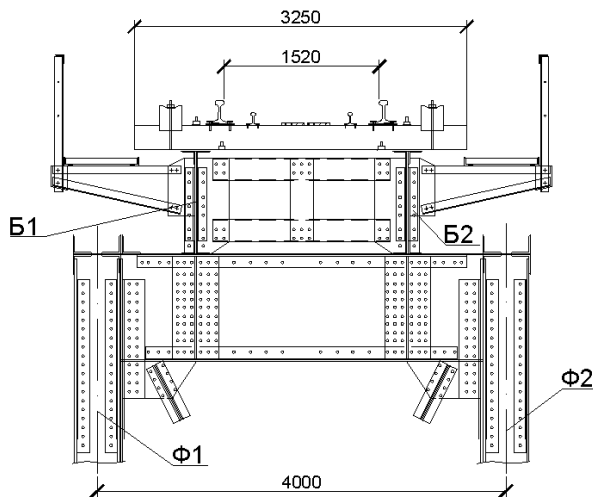


Рис. 1. Конструкція проїзної частини поверхового сполучення

Fig. 1. Track-way structure of the staged connection

Але внаслідок конструктивних недоліків такої споруди виникають численні дефекти:

- ослаблення та розрив вертикальних заклепок або болтів прикріплення поздовжніх балок до поперечних;
- нещільність спирання поздовжніх балок на поперечні;
- поздовжні тріщини в нижніх поясах кутиках поздовжніх балок уздовж обушків кутиків на їх кінцевих відрізках;
- тріщини уздовж обушків верхніх поясах кутиків поперечних балок у місцях спирання поздовжніх балок;
- виколи горизонтальних полиць верхніх поясах кутиків поперечних балок у зоні спирання поздовжніх балок.

Усе це свідчить про те, що конструкція сполучення балок проїзної частини з поверховим розташуванням поздовжніх і поперечних балок, застосована на мосту, є невдалою й вимагає підвищення надійності конструкцій прикріплення.

### Мета

Проблема в конструктивному вирішенні поверхового з'єднання балок проїзної частини, яка існує сьогодні, полягає в необхідності підвищення надійності конструкції вузла прикріплення поздовжніх балок до поперечних, тобто його підсиленні. Для цього необхідно дослідити деформаційно-напружений стан вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними до та після підсилення. У цій роботі для визначення раціональних параметрів конструкцій підсилення вузла балочної клітки поверхового сполучення виконано чисельне дослідження напружено-деформованого стану цього вузла. Метою досліджень було запропонувати конструкцію підсилення вузла, щоб позбутися руйнівних напружень у деталях поздовжніх і поперечних балок проїзної частини. Особливу увагу під час досліджень напружень було звернуто на визначення раціональних параметрів конструкції підсилення за мінімальних затрат, оскільки саме вартість ремонту має суттєве значення в сучасних умовах.

### Методика

Неодноразово були запропоновані проекти підсилення та ремонту поверхової конструкції балок проїзної частини [4]. Основні принципи й конструктивні рішення підсилення прогонових споруд мостів із поверховим розташуванням балок проїзної частини базуються на ідеї забезпечення максимального наближення роботи проїзної частини з поверховим сполученням балок до роботи проїзної частини поздовжніх і поперечних балок за розташування їх в одному рівні. Конструктивно це досягається тим, що під кожною поздовжньою балкою влаштовують додатковий пояс із чотирьох кутиків  $125 \times 80 \times 10$ , що об'єднані між собою та встановлені в рівні нижнього пояса поперечних балок цієї панелі й з'єднують додатковий пояс та поздовжню балку з вертикальними стінками попе-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

речних балок. При цьому об'єднання поздовжніх балок і додаткових поясів підвищує вдвічі висоту поздовжніх балок біля поперечних, відповідно знижуючи розрахункові зусилля в поясах поздовжніх балок над поперечними, збільшує довжину спирання поздовжніх балок і зону передачі від них зусиль на поперечну балку та знижує зусилля в поясах поздовжніх балок у середині панелей. Указане підсилення балок проїзної частини доповнене встановленням горизонтальних жорстких діафрагм, які з'єднують верхні пояси головних ферм із поздовжніми балками для включення останніх у сумісну роботу з поясами ферм від поїзного навантаження. Діафрагми горизонтальні зменшують горизонтальні згинальні моменти в поперечних балках і поліпшують умови роботи поперечних балок.

На основі вивчення технічної документації за типовими проектами, аналізу результатів попередніх обстежень цих прогонових споруд ПСК з поперечним сполученням балок проїзної частини, аналізу характеру та динаміки розвитку тріщин установлено таке:

– основною причиною появи тріщин і виколів у нижніх поясних кутиках поздовжніх балок у місцях їх спирання на поперечні, тріщин і виколів горизонтальних полицок верхніх поясних кутиків поперечних балок і розладнань вузлів спирання є недоліки прийнятого в проектах ПСК конструктивного рішення поперечного сполучення балок, яке призвело до місцевих перенапружень у металі;

– несприятливий вплив на напружений стан металу в місцях появи тріщин мають деформації балок, які виникають у разі сумісної роботи балок проїзної частини з верхніми поясами головних ферм під час завантаження всієї прогонової споруди рухомим складом; при цьому верхні пояси ферм скорочуються, поперечні балки згинаються в горизонтальному напрямку й закручуються, а в місці сполучення поздовжніх і поперечних балок виникають додатковий кут взаємного повороту, деформації кінцевих відрізків поясних кутиків поздовжніх балок та деформації верхніх поясних кутиків поперечних балок у місцях спирання на них поздовжніх балок;

– у зв'язку з відсутністю діагоналей поперечних в'язей між поздовжніми балками (у тому числі і в перерізах над поперечними балками) в разі дії горизонтальних поперечних навантажень від рухомого складу можлива деяка деформація контура поперечних в'язей і додаткові напруження в поясних кутиках поздовжніх балок на їх кінцевих відрізках та в кутиках поперечних балок;

– за наявності нещільності спирання поздовжніх балок на поперечні збільшуються динамічні навантаження на балки та з'являються осередки корозії, виплески та вироблення металу в місцях спирання;

– на відміну від з'єднання балок проїзної частини в одному рівні, за поперечного спирання поздовжніх балок на поперечні елементи прикріплення (заклепки або болти) та полицки поясних кутиків балок виявились неспроможними сприймати вертикальні моменти, які виникають у разі лінійних та кутових деформацій балок.

З аналізу результатів обстежень металевих прогонових споруд мостів із поперечним розташуванням балок проїзної частини [4–7] випливає, що в переважній більшості випадків клас прогонової споруди зазвичай визначає клас балок проїзної частини як найбільш дефектних елементів усієї прогонової споруди (табл. 1).

Одноманітна дефектність визначається як особливостями конструкції металевих прогонових споруд із поперечною проїзною частиною, так і тим фактом, що несприятливий вплив на напружений стан металу в місцях появи тріщин мають деформації балок, які виникають за сумісної роботи балок проїзної частини з верхніми поясами головних ферм.

Основними пріоритетними заходами з підвищення вантажопідйомності та подовження експлуатаційного ресурсу металевих прогонових споруд залізничних мостів, з урахуванням виявлених пошкоджень, визначено проведення ремонтних робіт, спрямованих на усунення наявних дефектів утомного характеру, модернізацію вузлів мостового полотна прогонових споруд та відновлення експлуатаційного ресурсу.

Таблиця 1

**Результати класифікації балок проїзної частини та елементів ферм металевих прогонових споруд мостів із поперковим розташуванням балок**

Table 1

**Classifications results of track-way stringers and truss elements of metal spans of bridges with a staged location of stringers**

№ з/п	Розташування моста	Довжина прогону, м	Клас балок, К	Клас елементів ферм, $K_{min}$
1	Через річку Мокра Московка на 186-му км лінії Кривий Ріг – Волноваха	44	3,9	7,84
2	Через річку Південний Буг на 49-му км лінії Вапнярка – Христинівка	55	4,77	6,38
3	Через річку Прут на 1662-му км лінії Курчуган – Унгени	70,63	4,92	6,53
4	Через річку Мала Вись на 995-му км лінії Шевченко – Помічна	44	4,6	8,2
5	Через річку Інгулець на 109-му км лінії Долинська – Верхівцеве – Ясинувата	55	4,8	6,5

### Результати

Як було зазначено раніше, головною проблемою залізничних прогонових споруд із поперковою проїзною частиною є крутий момент, що виникає в поперечній балці та через

4 болти прикріплення поперечної балки до поздовжньої передається на неї. Напруження в горизонтальних полицях кутиків досягають 230–330 МПа [14], що значно перевищує розрахункові значення опору металу.

Коли балки знаходяться в одному рівні (паралельне розміщення балок), ця проблема не виникає, оскільки відсутній ексцентриситет по висоті між поздовжніми та поперечними балками [10–12].

Найпростішим способом усунення цієї проблеми могло б стати вилучення поздовжніх балок із сумісної роботи з поясами ферм [4]. Цього можна досягнути від'єднанням поздовжніх балок від поперечних, але при цьому невирішеною залишиться проблема гальмівних зусиль, геометричної незмінності всієї конструкції. Також за реалізації цього методу суттєво збільшилась будівельна висота прогонової споруди, тому цей напрям був визначений як такий, що важко реалізується в цій конструкції.

Наступним методом, що може перешкодити викручуванню поперечних балок, є об'єднання їх у районі нижнього пояса спеціальними в'язями, як запропоновано проєктним інститутом «Гипротранспуть» [4]. Основна ідея – максимально забезпечити наближення роботи проїзної частини з поперковим сполученням балок до роботи проїзної частини поздовжніх і поперечних балок за розташування їх в одному рівні. При цьому об'єднання поздовжніх балок і додаткових поясів підвищує вдвічі висоту поздовжніх балок біля поперечних, відповідно знижуючи розрахункові зусилля в поясах поздовжніх балок над поперечними, збільшує довжину спирання поздовжніх балок і зону передачі від них зусиль на поперечну балку та знижує зусилля в поясах поздовжніх балок в середині панелей. Зусилля, що виникатимуть у в'язях, будуть утримувати поперечні балки від викручування, а болти прикріплення будуть працювати лише на зсувні зусилля. Але такий спосіб надто затратний за вартістю та трудомісткістю.

Іншим напрямом усунення проблеми є підсилення самого вузла спирання поздовжньої балки на поперечну. Для вирішення проблем конструктивного рішення поперкового спирання балок пропонуємо встановлення консольних

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

листів, розташованих уздовж поздовжньої балки та прикріплених до стінки поперечної балки й посиленних сталевими кутиками (рис. 2).

Таку конструкцію направлено на підсилення вузла спирання поздовжньої балки на поперечну, зменшення небажаних деформацій, усунення появи дефектів вузла та зменшення матеріальних затрат і витрат часу під час ремонтних робіт.

Для забезпечення надійної та ефективної роботи запропонованого вузла необхідно відшукати найвигідніші параметри для кожного збірного елемента конструкції вузла окремо та за сумісної роботи всіх елементів разом.

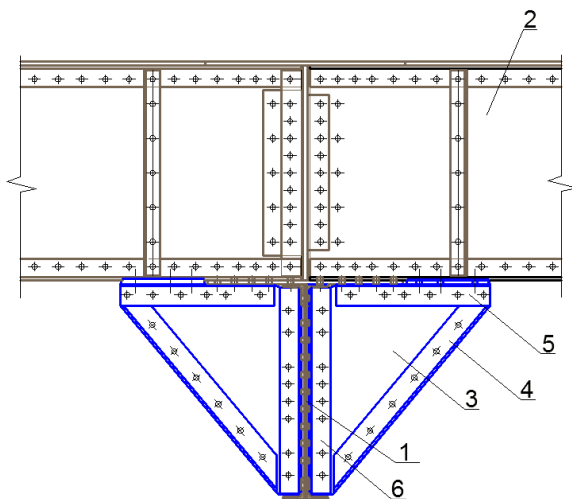


Рис. 2. Вузол спирання поздовжньої балки на поперечну:

- 1 – поперечна балка, 2 – поздовжня балка,  
3 – консольні опорні листи, 4 – кутики підсилення,  
5 – кутики кріплення листів до пояса поздовжньої балки,  
6 – кутики кріплення листів до стінки поперечної балки

Fig. 2. Support node of the stringer on the floor beam:

- 1 – floor beam, 2 – stringer,  
3 – cantilever support plates, 4 – strengthening angles,  
5 – plates attach angles to the flange of the stringer,  
6 – plates attach angles to the wall of the floor beam

Головний критерій підбору параметрів вузла – це зменшення небажаних концентрацій напружень у балках проїзної частини зі встановленими додатковими консольними листами й посиленними сталевими кутиками, описаними раніше, за найменших матеріальних затрат.

Параметри елементів, що підлягали дослідженню, це:

- величина консолі;
- товщина консольного опорного (фасонного) листа;
- розмір кутиків підсилення (величина та товщина стінки);
- величина деформації (прогину) характерної точки, що впливає на кут повороту опорного перерізу поздовжньої балки, та її залежність від підібраних елементів підсилення.

Для визначення величини консолі була побудована просторова консольна розрахункова схема зі стрижневих та плоских кінцевих елементів [11]. За розрахункову модель поздовжньої балки було взято просторову модель із кінцевих елементів у вигляді пластин, що моделюють балки цієї прогонової споруди. Розрахунки проведено за допомогою методу скінченних елементів у програмному комплексі Selena 4.1.1 (ліцензійний ключ 1802619725) [9].

Розміри всіх пластин (верхня та нижня полиця, стінка балки) змодельовано чітко відповідно до реальної конструкції. Кутики підсилення консолі взято як стрижень. За розрахункове було взято статичне рівномірно розподілене навантаження, величина якого становить 50 кН/м. Отриману просторову модель показано на рис. 3.

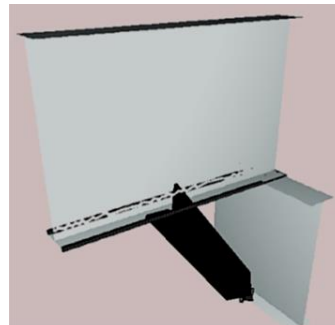


Рис. 3. Просторова модель для визначення величини консолі

Fig. 3. Spatial model for determining the cantilever size

Параметр величини консолі було підібрано за максимальними величинами напружень у нижньому поясі поздовжньої балки та верхньому поясі поперечної балки. Отримані напруження подано в табл. 2.

Таблиця 2

Отримані напруження в поздовжніх та поперечних балках за різної величини консолі

Table 2

Obtained stresses in the stringers and floor beams for different sizes of the cantilever

Величина консолі, см	Максимальні напруження, МПа				Прогин консолі, мм
	Поздовжня балка		Поперечна балка		
0	660	-180	1560	-120	103,4
20	188	-36	75	-18	3,2
30	72	-108	82,5	-7,5	1,65
40	30	-33	84	-6	1,1
50	33	-23	88	-4	0,84
60	32	-16	88	-4	0,67
70	33	-29	88	-4	0,63
80	33	-10	88	-4	0,59
90	33	-11,2	88	-4	0,56
100	33	-11,5	88	-4	0,54

Графіки максимальних напружень показано на рис. 4 та 5, а отримані поля напружень поясів балок при цьому зображено рис. 6 та 7.

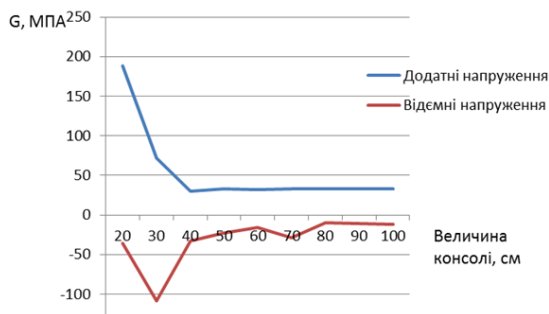


Рис. 4. Максимальні напруження поздовжньої балки, МПа

Fig. 4. Maximum stresses of the stringer, МПа

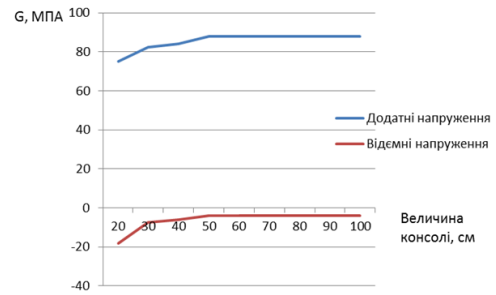


Рис. 5. Максимальні напруження поперечної балки, МПа

Fig. 5. Maximum stresses of the floor beam, МПа

Максимальні напруження поздовжньої та поперечної балок за величини консолі більше ніж 40 см достатньо стабільні.

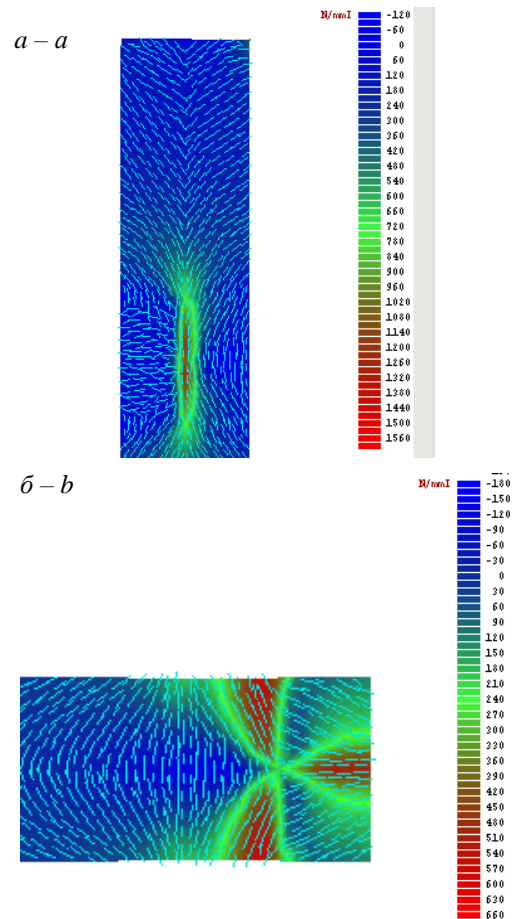


Рис. 6. Напружений стан поясів поздовжньої балки просторової моделі без консолі, МПа: а – верхнього; б – нижнього

Fig. 6. Stress-strain state of the stringer flanges of the spatial model without a cantilever, МПа: а – the upper one; б – the lower one

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Проаналізувавши поля головних напружень, можна з упевненістю сказати, що робота балок у разі гірша без консолі. Напруження в обох балках стабілізуються, починаючи з величини консолі в 40÷50 см. Але за величини консолі 80 см напружений стан поздовжньої балки є мінімальним. Прогини фіксованої точки (див. рис. 8), що впливає на кут повороту вузла спирання балок, свідчать, що за величини консолі в 70 та 80 см різниця зменшення величини прогину є кращим критерієм для визначення раціональних параметрів.

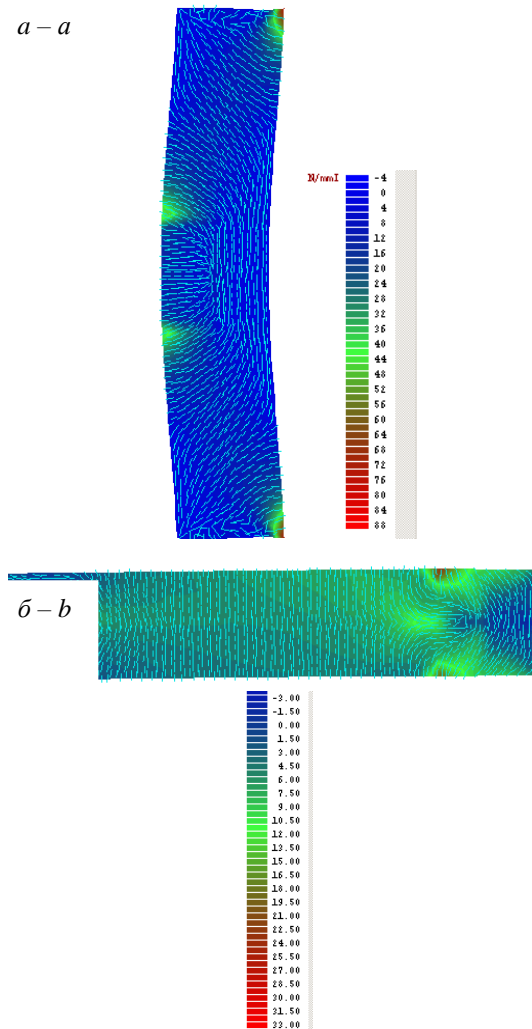


Рис. 7. Напружений стан поясів поздовжньої балки просторової моделі з консолюю 80 см, МПа:  
а – верхнього; б – нижнього

Fig. 7. Stress-strain state of the stringer flanges of the spatial model without with a cantilever of 80 cm, MPa:  
a – the upper one; b – the lower one

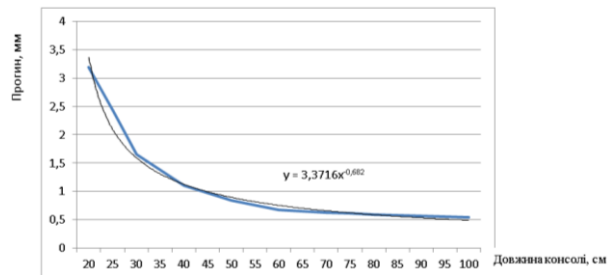


Рис. 8. Графік залежності прогину фіксованої точки на поздовжній балці від величини консолі

Fig. 8. Dependence graph of a fixed point deflection on the stringer on the size of the console

Одночасний аналіз напружено-деформованого стану балок просторової моделі засвідчує, що оптимальна величина консолі становить 80 см.

Для вирішення питань підбору товщини металевго листа консолі та величини кутиків підсилення було проведено розрахунки моделі зі стрижневих та плоских кінцевих елементів, де параметри елементів змінювались. Товщину металевго листа розглядали від 8 до 12 мм, а кутики підсилення – від 80×80×7 до 125×125×8. Завантаження балки також виконано статичним рівномірно розподіленим навантаженням, величина якого 20 кН/м. Результати розрахунків наведено в табл. 3.

У результаті аналізу отриманих показників, можна зробити висновки, що розмір кутика майже не впливає на напружений стан металевго горизонтального листа балок. Напружений стан самого кутика залежить більше від товщини полиці кутика ніж від величини кутика, і напруження рівномірно зменшуються залежно від товщини листа консолі та розміру самого кутика. У реальних конструкціях прогонових споруд встановлені кутики 100×100×10 та листи товщиною 10 мм. Тому, зважаючи на уніфікацію конструктивних проектних рішень, доцільно в посиленні вузла спирання балок одна на одну теж узяти кутики 100×100×10 та металеві листи товщиною 10 мм.

Таблиця 3  
Результати розрахунків параметрів елементів підсилення

Table 3  
Calculation results of the parameters of the strengthening elements

№ з/п	Кутик, мм	Товщина листа, мм	Напруження, МПа		Прогин характерної точки, мм
			Кутик	Лист	
1	2	3	4	5	6
1	80×80×7	Δ=8	43,7	6,0	4,18
		Δ=10	35,8	5,0	3,83
		Δ=12	34,5	4,5	3,55
2	80×80×10	Δ=8	37,6	5,0	3,44
		Δ=10	33,8	4,4	3,19
		Δ=12	30,6	3,6	2,99
3	90×90×7	Δ=8	40,7	6,0	3,89
		Δ=10	36,0	5,0	3,58
		Δ=12	32,2	4,4	3,33
4	90×90×9	Δ=8	36,4	5,0	3,37
		Δ=10	32,8	4,4	3,13
		Δ=12	29,6	4,0	2,94
5	100×100×7	Δ=8	38,0	5,5	3,63
		Δ=10	33,8	5,0	3,36
		Δ=12	30,4	4,4	3,13
6	100×100×10	Δ=8	32,1	4,4	2,93
		Δ=10	29,1	3,6	2,75
		Δ=12	26,5	3,6	2,59
7	125×125×8	Δ=8	30,7	4,4	2,86
		Δ=10	27,2	4,0	2,69
		Δ=12	25,3	3,6	2,54

Дослідження напружено-деформованого стану запропонованого вузла спирання поздовжніх балок на поперечні. Для визначення величини напружень у балках зі встановленими додатковими консольними листами й посилен-

ними сталевими кутиками, описаними раніше, було змодельовано просторовий вузол з'єднання балок поверхового типу з елементами підсилення (рис. 9). Для побудови моделі в натуральну величину також використано кінцеві елементи трикутної форми, які було генеровано в поверхні відповідної товщини металу у збірці.

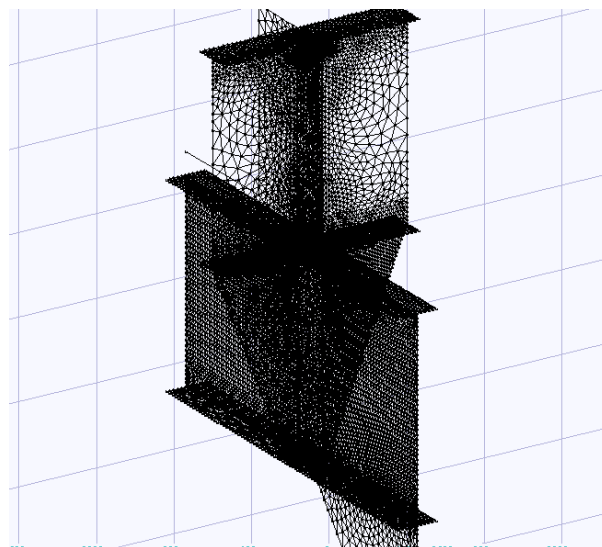


Рис. 9. Загальний вигляд просторової моделі вузла з підсиленням

Fig. 9. General view of the spatial model of the node with reinforcement

У результаті було отримано скінченно-елементну модель, що складається з 17 107 вузлів та 34 374 кінцевих елементів.

Навантаження на модель виконували за крайовими умовами з урахуванням отриманих зусиль у просторовій моделі ферми, аналогічних навантаженню попередніх розрахунків без підсилення вузла.

Після розрахунку отримано поля напружень, які зображено на рис. 10.

Якщо порівняти ці результати з попереднім випадком, коли підсилення відсутнє, то можна констатувати, що напруження в кутиках горизонтальних полиць поздовжньої балки з підсиленням зменшилось на 73 % до 54 МПа, а напруження за верхніми горизонтальними полицями кутиків поперечної балки з підсиленням зменшилось на 43–48 % до 170 МПа.



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

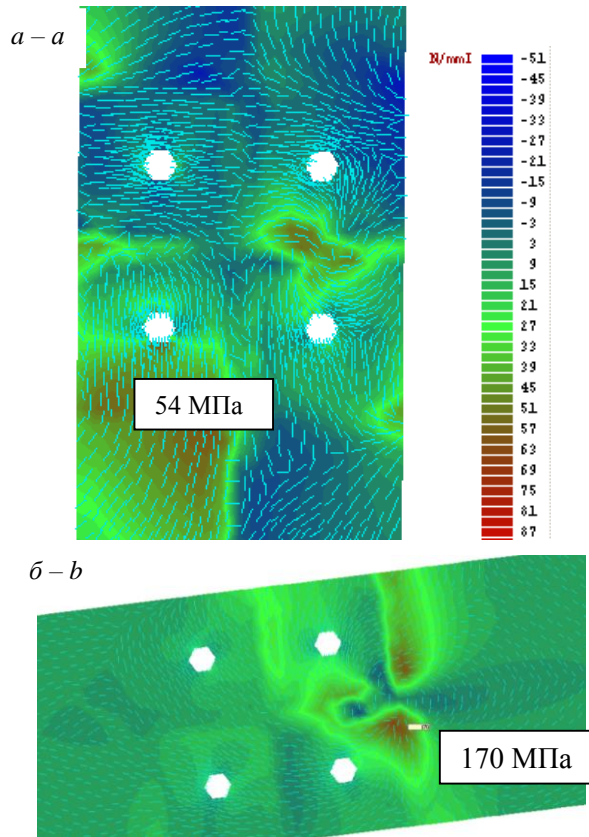


Рис. 10. Напружений стан за горизонтальними полицями кутків із підсиленням, МПа:  
*a* – поздовжньої балки; *б* – поперечної балки

Fig. 10. Stress-strain state behind the horizontal legs of the angles with reinforcement, MPa:  
*a* – stringer; *b* – floor beam

### Наукова новизна та практична значимість

У ході дослідження вивчено технічну документацію за типовими проектами «Проектстальконструкції», проведено аналіз результатів попередніх обстежень даних прогонових споруд ПСК з поверховим сполученням балок проїзної частини, аналіз характеру та динаміки розвитку тріщин. Також проаналізовано результати обстежень металевих прогонових споруд мостів із поверховим розташуванням балок проїзної частини [4–7] й виявлено, що в переважній більшості випадків клас прогонової споруди зазвичай визначає клас балок проїзної частини як найбільш дефектних елементів усєї споруди.

У роботі досліджено напружено-деформований стан підсилення вузла спирання металевих балок проїзної частини поверхового розташування. Запропоновано нову конструкцію підсилення вузла спирання поздовжніх балок на поперечні з підбором раціональних параметрів конструкції.

Представлена конструкція, на відміну від попередніх:

- не усуває включення в сумісну роботу поздовжніх балок;
- не протидіє виникненню крутного моменту в поперечній балці.

Головна мета цієї конструкції – більш плавно передати зусилля з поперечної балки на поздовжню, суттєво збільшуючи площу їх взаємного спирання.

За отриманими результатами було оформлено патент на корисну модель № 109806 від 12.09.2016 [2].

Особливістю прогонових споруд, створених за кресленнями «Проектстальконструкції», є однотипність проїзної частини, що дозволило розробити креслення консолей підсилення, які підійдуть до будь-яких прогонових споруд за цією серією. Додатковою перевагою цього способу є той факт, що матиме місце суттєве збільшення вантажопідйомності поздовжніх балок. Цей спосіб ремонту найбільш раціональний (рекомендовано для моста через річку Інгулець на 109-му км лінії Верхівцеве – Долинська, договір № 94/2011–Цтех–177/2011–ЦЮ від 30.09.2011 [8]. «Проведення досліджень стану залізничних металевих мостів з двоповерховою проїзною частиною та шляхи їх реконструкції під сучасні вимоги»).

### Висновки

За результатами розрахунків та комп'ютерного моделювання визначено, що основною причиною появи тріщин є конструктивна недосконалість вузлів спирання поздовжніх балок на поперечні прогонової споруди з поверховою проїзною частиною, характерна для аналогічних конструкцій. Аналіз напружено-деформованого стану наявної конструкції вузла спирання поздовжніх балок на поперечні свідчить про складні умови роботи балочної клітини. Напруження в горизонтальних поли-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

цях кутиків досягають 230–330 МПа, що значно перевищує розрахункові значення опору металу.

Запропонована нова конструкція вузла спираючого поздовжніх балок на поперечні усуває недолік концентрації напружень. Виявлено раціональні параметри вузла: величина консолю підсилення становить 80 см, величину елементів вузла взято за конструктивними характерис-

тиками типового проєкту тому, що ці величини мають малий вплив на НДС вузла.

Дослідження напружено-деформованого стану запропонованого вузла спираючого поздовжніх балок на поперечні показало, що максимальні напруження в горизонтальних полицках поясних кутиків поздовжніх і поперечних балок (за цих умов) зменшились на 43–73 % та становлять 100–170 МПа.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бычковский Н. Н., Данковцев А. Ф. *Металлические мосты*. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 2005. 364 с.
2. *Вузол спираючого поздовжньої балки на поперечну*: пат. 109806 Україна: МПК Е 01 D 1/00, Е 01 D 19/00, Е 01 D 101/30. № у 2016 01940; заявл. 29.02.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 4 с.
3. Едвабный В. И. Результаты расчетно-экспериментального исследования работы эластично расположенных балок проезжей части однопутных мостов. *Вопросы статической и динамической работы мостов*: Межвуз. сб. науч. тр. ДИИТа. 1972. Вып. 127. С.134–140.
4. Ключник С. В., Марочка В. В. Обзор вариантов усиления та ремонту балок проїзної частини поверхового типу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2014. № 6. С. 35–40.
5. *Науково-дослідна робота (НДР) № 279 «Обследование и испытание железнодорожного моста через р. Мокрая – Московка на 188 км линии Долгинево – Волноваха Приднепровской железной дороги»*. ГНДЛ штучних споруд ДНУЗТ, 1970. 72 с.
6. *НДР № 603 від 22.04.2004 р. «Визначення вантажопідйомності прогонових будов  $l=55,0$  м на мосту через річку Південний Буг на 49 км лінії Вапнярка – Христинівка і розробка рекомендацій по підготовці мосту до швидкісного руху поїздів»*. ГНДЛ штучних споруд ДНУЗТ, 2004. 59 с.
7. *НДР № 604 «Обстеження і випробування металевих прогонових будов з поверховою проїзною частиною моста 995 км лінії Шевченко – Помічна та розробка рекомендацій по підсиленню балок проїзної частини, в яких виникли і розвиваються тріщини»*. ГНДЛ штучних споруд ДНУЗТ, 2004. 50 с.
8. *НДР № 94/2011-Цтех-177/2011-ЦЮ від 30.09.2011 р. «Проведення досліджень стану залізничних металевих мостів з двоповерховою проїзною частиною та шляхи їх реконструкції під сучасні, вимоги»* Київ «Укрзалізниця», 2011. 120 с.
9. Расчетный модуль Selena. URL: <http://www.itech.net.ua/ru/calculation-module-selena> (дата звернення: 09.11.2020).
10. Bokarev S. A., Zhunev K. O., Usol'tsev A. M. Stress-strain behavior of welded joints in railway girders. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 8. P. 119–129.
11. Diachenko L., Benin A., Smirnov V., Diachenko A. Rating of dynamic coefficient for simple beam bridge design on high-speed railways. *Civil and Environmental Engineering*. 2018. Vol. 14. Iss. 1. P. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2018-0005>
12. Glovnea M., Manolache-Rusu C., Suciuc C. Modeling of stress and strain states induced by torsion of straight rods with elliptical cross sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Iasi, 19-22 June 2019). Iasi, Romania, 2019. Vol. 591. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/591/1/012047>
13. Kitov Y., Verevicheva M., Vatulia G., Orel Y., Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 133. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713303001>
14. Kluchnik S. V. Stress-strain state of beam staged connection point of the railway bridge track-way. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 3 (69). P. 160–170. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104762>

S. V. KLIUCHNYK<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

## Operation Study of the Node of Stringer Staged Connection Point of the Railway Bridge Track-Way

**Purpose.** The staged connections of the stringers of railway bridge track-way have the simplest design, but some design flaws result in numerous defects. The purpose of this work is an investigation of the previously proposed methods of strengthening the support node for the stringers of the track-way of a staged communication, as well as investigation of the work of the reinforcement proposed by the author. **Methodology.** The author analyzes the condition of metal bridges operated on the railway. It was found that the decisive element in determining the load capacity of the entire bridge are the stringers of the track-way. To achieve this goal, the author analyzed the stress-strain state of the support node of the stringer on the cross-bar without and with reinforcement using the finite element method. The discovered rational parameters of the proposed reinforcement unit. The calculations were performed in Selena software. **Findings.** Stress-strain state of the connection point of the stringers with the floor beams node on condition of their staged position was obtained and analyzed. The author selected the rational parameters of the reinforcement elements of the stringer support node for the staged communication and analyzed stress-strain state of the new connection node of the stringers with the floor beams at their staged location based on typical spans of Proiektstakonstruktzii LLC (PSK). The analysis shows that after the proposed reinforcement, the maximum stresses in the horizontal legs of the flange angles of the stringers and floor beams, which destroyed the structures, decreased by 43–73%. **Originality.** The work analyzes the stress-strain state of metal stringers of the track-way of the staged location taking into account the joint work of stringers with load-bearing trusses, as well as the stress-strain state of the proposed reinforcement of the support node of metal stringers with the identification of rational parameters. **Practical value.** This method of repair with reinforcement is recommended as the most rational for a bridge over the Inhulets river at 109 km of the Verkhivtseve – Dolynska Railway (contract No. 94/2011–TsTekh–177/2011–ETU dated 09/30/2011). Based on these results, a patent for utility model No. 109806 dated 09/12/2016 was issued.

*Keywords:* stringers; strain; stress; floor beams; metal spans

### REFERENCES

1. Bychkovskiy, N. N., & Dankovtsev, A. F. (2005). *Metallicheskie mosty*. Yuri Gagarin state technical university of Saratov. (in Russian)
2. Kliuchnyk, S. V., & Marochka, V. V. (2016). *UA Patent № u 2016 01940*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT).
3. Yedvabnyy, V. I. (1972). Rezultaty raschetno-eksperimentalnogo issledovaniya raboty etazhno raspolozhennykh balok proezzhey chasti odnopusnykh mostov. *Voprosy staticheskoy i dinamicheskoy raboty mostov*, 27, 134-140. (in Russian)
4. Klyuchnik, S. V., & Marochka, V. V. (2014). Review of enhancement and repair options for roadway beams of two-level type. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 6, 35-40. (in Ukrainian)
5. *Naukovo-doslidna robota (NDR) № 279 «Obsledovanie i ispytanie zheleznodorozhnogo mosta cherez r. Mokraya-Moskovka na 188 km liniyi Dolgintsevo-Volnovakha Pridneprovskoy zheleznoy dorogi»*. (1970). HNDL shtuchnykh sporud DNUZT. (in Russian)
6. *NDR № 603 vid 22.04.2004 r. «Vyznachennya vantazhopidyomnosti prohonovykh budov l=55,0 m na mostu cherez richku Pivdennyi Buh na 49 km liniyi Vapnyarka- Khrystynivka i rozrobka rekomendatsiy po pidhotovtsi mostu do shvydkisnoho rukhu poyizdiv»*. (2004). GNDL shtuchnykh sporud DNUZT. (in Ukrainian)
7. *NDR № 604 «Obstezhennya i vyprovuvannya metalevoyi prohonovoyi budovy z poverkhovoyu proyiznoyu chastynoyu mosta 995 km liniyi Shevchenko – Pomichna ta rozrobka rekomendatsiy po pidsylennyu balok proyiznoyi chastyny, v yakykh vynykly i rozvyvayut'sya trishchyny»*. (2004). GNDL shtuchnykh sporud DNUZT. (in Ukrainian)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

8. NDR № 94/2011-Tstekh-177/2011-TsYu vid 30.09.2011 r. «Provedennya doslidzhen' stanu zaliznychnykh metalovykh mostiv z dvopo-verkhovoyu proyiznoyu chastynoyu ta shlyakhy yikh rekonstruktsiyi pid suchasni, vymohy». (2011). Kyiv «Ukrzaliznytsia». (in Ukrainian)
9. Raschetnyy modul Selena. Retrieved from <http://www.itech.net.ua/ru/calculation-module-selena> (in Ukrainian)
10. Bokarev, S. A., Zhunev, K. O., & Usol'tsev, A. M. (2018). Stress-strain behavior of welded joints in railway girders. *Magazine of Civil Engineering*, 8, 119-129. (in English)
11. Diachenko, L., Benin, A., Smirnov, V., & Diachenko, A. (2018). Rating of dynamic coefficient for simple beam bridge design on high-speed railways. *Civil and Environmental Engineering*, 14(1), 37-43. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2018-0005>
12. Glovnea, M., Manolache-Rusu, C., & Suci, C. (2019, June). Modeling of stress and strain states induced by torsion of straight rods with elliptical cross sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 591, pp. 1-11). Iasi, Romania. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/591/1/012047> (in English)
13. Kitov, Y., Verevicheva, M., Vatulia, G., Orel, Y., & Deryzemlia, S. (2017). Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences* (Vol. 133, pp. 1-4). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713303001> (in English)
14. Kluchnik, S. V. (2017). Stress-strain state of beam staged connection point of the railway bridge track-way. *Science and Transport Progress*, 3(69), 160-170. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104762> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.10.2020

Прийнята до друку: 02.02.2021