ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2022, № 1 (97)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.21.04.2

М. М. ПОПОВИЧ[1], С. В. КЛЮЧНИК[2*]

[1]Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел.+38 (0562) 33 58 12, ел. пошта popovich.n.m@ukr.net, ORCID 0000-0003-1790-3110
[2*]Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 58 12, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Особливості напружено-деформованого стану сталезалізобетонної прогонової будови з попереднім вигином сталевої балки

Мета. Автори передбачають визначити особливості роботи сталезалізобетонної прогонової будови з балками, армованими двотавром, з їх попереднім напруженням за допомогою вигину. **Методика.** Для виготовлення сталезалізобетонної прогонової будови запропоновано армувати двотаврову балку з попереднім будівельним підйомом, який потім вирівнюють за допомогою прикладених зовнішніх навантажень. Для практичної зручності вертикальні зовнішні сили замінено на пару горизонтальних сил, що утримують металеву двотаврову балку в деформованому стані, у такому стані балку бетонують. Після набору міцності бетону зовнішні сили прибирають, і двотаврова металева балка створює попереднє напруження бетону. **Результати.** Для визначення напружень використано перевіркові розрахунки аналітичним методам та методом моделювання за допомогою програми ANSYS. Побудовано епюри напружень за нижніми та верхніми фібрами металевої двотаврової балки та напруження в бетоні верхньої й нижньої зон балки. Аналіз показав, що попередній вигин металевої балки можна використовувати для створення попереднього напруження, що поліпшує працездатність сталезалізобетонних прогонових будов, збільшує їх жорсткість і дозволяє використовувати таку конструкцію для збільшення прогонів залізничних та автодорожніх мостів. **Наукова новизна.** У роботі проведено дослідження напружено-деформованого стану сталезалізобетонних балок залізничної прогонової будови з урахуванням попереднього напруження бетону. Запропоновано метод виготовлення сталезалізобетонних балок, що забезпечує попереднє напруження залізобетону за рахунок вигину сталевої двотаврової балки. **Практична значимість.** У результаті розрахунків виявлено, що конструкція, виготовлена вказаним методом, має більшу жорсткість порівняно із залізобетонними або металевими балками. Висота балки може бути меншою, ніж залізобетоні або металеві прогонові будови. Це важливо для залізничних мостів, особливо для швидкісного руху.

Ключові слова: сталезалізобетонна прогонова будова; будівельний підйом; металева балка; епюра напружень; напружено-деформований стан; комбінована модель

Вступ

Швидкісний рух потягів потребує великої кількості нових мостових споруд. Індустрія Бельгії виконує великий обсяг робіт із виробництва будівельних конструкцій, використовуючи сталезалізобетонні двотаврові та u–подібні [2, 10] балки повного заводського виготовлення під автомобільне та залізничне навантаження [1]. Виготовлення прогонових будов засновано на способі попереднього вигину металевої частини, яку потім бетонують. Така конструкція отримала назву балки «preflex», або «flexstress» [6].

Перші сталезалізобетонні балки «preflex» були виготовлені 1951 р. На двох об’єктах бу-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2022/265333
© М. М. Попович, С. В. Ключник, 2022

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2022, № 1 (97)

дівництва Tour du Midi та Berlaymont Building загальна кількість балок склала 453 шт., довжиною до 40 м [6, 10]. Preflex-балки – це прокатні металеві балки із залізобетонною нижньою полицею (рис. 1). Особливість їх виготовлення полягає в попередньому вигині прокатної балки з подальшим бетонуванням нижньої полиці. Бетонна частина стиснута, таким чином, отримує попереднє напруження, що призводить до підвищення опору вигину й мінімального прогину балок під час експлуатації моста [6, 11].

Виготовлення балок «preflex» складається із двох етапів. На першому етапі бетонують нижній пояс, на другому – останню частину балки на місці монтажу. Такий прийом бетонування збільшує жорсткість сталезалізобетонного перерізу порівняно з попередньою жорсткістю перерізу сталевого елемента.

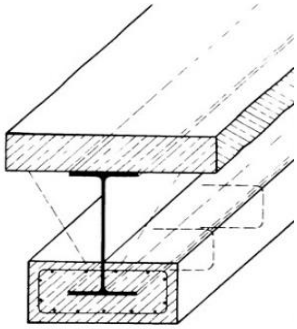

Рис. 1. Preflex-балки

Fig. 1. Preflex-beams

Використання цього прийому під час виготовлення прогонових будов такої конструкції дозволило будівельникам перекривати прогони великої довжини за найменшої будівельної висоти [6, 10].

Пошуки конструктивних форм прогонових будов для залізничного та автомобільного транспорту, які б відповідали місцевим умовам, сьогодні є актуальними [2]. Доволі часто вимогами до конструкцій, особливо для швидкісного руху, є збільшена довжина прогонів, більша жорсткість прогонових будов, зменшена будівельна висота та достатньо низький рівень шуму під час використання (шум повинен бути зведений до екологічно вподобаних параметрів).

Мета

Передбачено проаналізувати роботу балок прогонових будов із попереднім напруженням бетону за рахунок попереднього вигину (примусовий будівельний підйом) металевої двотаврової балки, яку потім вирівнюють за допомогою прикладених зовнішніх навантажень. При цьому для практичної зручності вертикальні зовнішні сили замінено на пару горизонтальних сил, що утримують металеву двотаврову балку в деформованому стані, у такому стані балку бетонують (вмуровують у залізобетонну конструкцію). Також необхідно виявити напружено-деформований стан прогонової будови на всіх стадіях виготовлення й роботи конструкції, провести аналіз результатів розрахунку.

Методика

Пропонуємо такий спосіб виготовлення залізничної сталезалізобетонної прогонової будови, армованої двотавровою балкою з попереднім будівельним підйомом: вертикальний лист двотавра розкроюють із верхньою та нижньою кромкою за формою лінії прогину балки під власною вагою. Величина підйому дуги дорівнює величині прогину балки. До цих кромок дуг приварюють верхній та нижній листи двотавра. Попереднє напруження металевої балки перед її бетонуванням виконують вирівнюванням двотавра за допомогою зовнішніх сил.

У роботі досліджено напружений стан сталезалізобетонної балки розрахункової довжини $L_{розр}$=15,8 м таврового перерізу під залізницю (рис. 2). Металеву балку виготовлено зі сталі 06Г2БД, із розрахунковим опором R_y=445 МПа, бетон класу В30.

Наведений переріз бетонної балки наближено до геометричних розмірів типових залізобетонних балок залізничних мостів серії 3.501.1–146. Розміри металевого двотавра взято по можливості розташування двотавра в бетоні, без перевіркових розрахунків усієї балки за граничними станами.

Виконано порівняння аналітичних розрахункових величин напружень у бетоні та в металевій балці на всіх стадіях виготовлення прогонової будови з комп'ютерним моделюванням роботи комбінованої сталезалізобетонної конструкції.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2022/265333
© М. М. Попович, С. В. Ключник, 2022

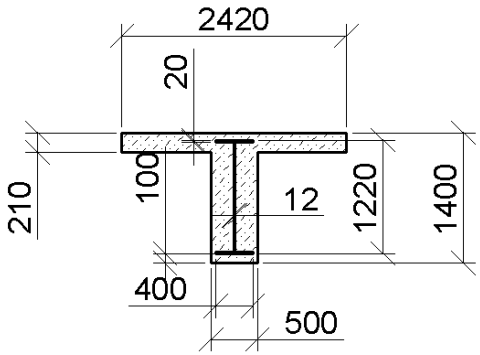

Рис. 2. Переріз сталезалізобетонної балки

Fig. 2. Section of a steel-reinforced concrete beam

Для дослідження використано програмний метод розрахунку – метод скінченних елементів [8, 11]. Об'ємне моделювання виконано в програмі Autodesk AutoCAD (США) (рис. 3, 4), обчислення готової моделі – у програмі ANSYS (США).

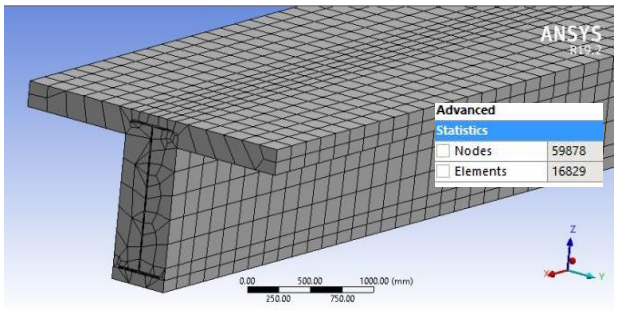

Рис. 3. Модель сталезалізобетонної прогонової будови

Fig. 3. Model of steel-reinforced concrete span structure

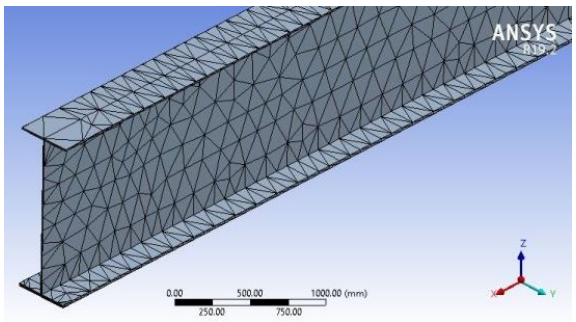

Рис. 4. Розбиття металевого двотавра прогонової будови

Fig. 4. Breakdown of the metal I-beam of the span structure

Послідовність визначення напруженого стану наближена до послідовності виготовлення блока прогонової будови (рис. 5):

– установлення сталевої балки з необхідним будівельним підйомом на опори (навантаження власною вагою металевої балки $g_{ввм}$);

– вигин сталевої балки за допомогою двох зосереджених сил P, що розташовані на відстані $0{,}4L_{розр}$ від опорних перерізів (навантаження власною вагою $g_{ввм}$ та силами P);

– заміна зосереджених сил на згинальний момент M (навантаження власною вагою $g_{ввм}$ та моментом M);

– бетонування блока прогонової будови (навантаження власною вагою металевої балки $g_{ввм}$ та власною вагою бетонної частини балки $g_{бет}$, разом зі згинальним моментом M);

– зняття згинального моменту M;

– завантаження блока вагою мостового полотна (навантаження власною вагою сталезалізобетонної балки $g_б$ та навантаження $g_{м.п.}$);

– навантаження прогонової будови тимчасовим навантаженням g_v.

Пружність визначає можливість металу пружно деформуватися. Пружна деформація в металі зникає після закінчення дії моменту (пари горизонтальних сил).

Такі властивості притаманні металу, який схильний до впливу поступово доданих або повільно прибраних сил, та характеризують статичні властивості.

Сили, прикладені до сталевої балки, розраховано після досягнення металом напружень, що відповідають 0,8 Ry сталі 06Г2БД.

Результати

Розглянемо поетапну роботу залізничної балкової розрізної сталезалізобетонної прогонової будови що армована двотавровою металевою балкою висотою 1 220 мм, з їздою зверху. Полиці верхнього та нижнього пояса металевої балки мають ширину 400 мм і товщину 20 мм, вертикальний лист δ=12 мм.

Перед обчисленням моделі у програмі ANSYS її було розбито на 16 829 гексаедральних скінченних елементів (рис. 3), що забезпечує достатньо високу точність розрахунків.

Вигин металевої балки під час виготовлення було засновано на величині межі плинності сталі 0,8 R_y (355 Мпа), він становить 100 мм.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2022/265333
© М. М. Попович, С. В. Ключник, 2022

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2022, № 1 (97)

Розміри бетонної частини балки взято відповідно до конструктивних параметрів залізобетонних типових балок.

Попереднє напруження металевої балки створено за допомогою двох вертикальних зосереджених сил по 642 кН, що встановлені на відстані 6,32 м ($0{,}4L_{розр}$) від опор.

Для зручності бетонування дію вертикальних сил замінено на дію згинального моменту парою горизонтальних сил. Після бетонування та набору міцності бетону згинальний момент прибирають, що створює зворотний вигин металевої балки та безпосередньо попереднє напруження в бетоні. Далі модель навантажено поетапно власною вагою сталезалізобетонної балки ($g_б$=27,0 кН/м), вагою мостового полотна на баласті ($g_{м.п.}$=28,4 кН/м) та тимчасовим навантаженням (g_v=96,23 кН/м).

На рис. 5 наведено розрахункові схеми та етапи навантаження сталезалізобетонної балки:

1) окреме навантаження металевої двотаврової балки власною вагою (для визначення прогину, який потрібно врахувати під час виготовлення металевого двотавра);

2) навантаження металевої двотаврової балки за допомогою двох вертикальних зосереджених сил по 642 кН, що встановлення на відстані 6,32 м ($0{,}4L_{розр}$) від опор;

3) момент, спричинений вертикальними силами *P*, продубльовано парою горизонтальних сил *N*=3429 кН;

4) навантаження власною вагою сталезалізобетонної балки $g_б$=27,0 кН/м (метал із бетоном) разом із горизонтальними силами *N*;

5) зняття згинального моменту М, що давало попереднє напруження металевої балки (відсутні горизонтальні сили *N*);

6) до власної вагу сталезалізобетонної балки додано вага мостового полотна $g_{м.п.}$=28,4 кН/м;

7) до попереднього навантаження додано тимчасове навантаження g_v=96,23 кН/м.

Розрахунки всіх етапів навантаження виконано аналітичним способом та за допомогою програмного забезпечення ANSYS методом скінченних елементів.

Для кожного з етапів навантаження визначено напруження у верхній фібрі верхнього пояса та нижній фібрі нижнього поясу металевого двотавру, а також для схем №5, 6 і 7 визначено напруження в бетоні верхньої та нижньої зон балки.

На рис. 10 наведено результати переміщень моделі методом скінченних елементів, що становить 10,4 мм, із навантаженням власною вагою балки та мостового полотна разом із тимчасовим навантаженням.

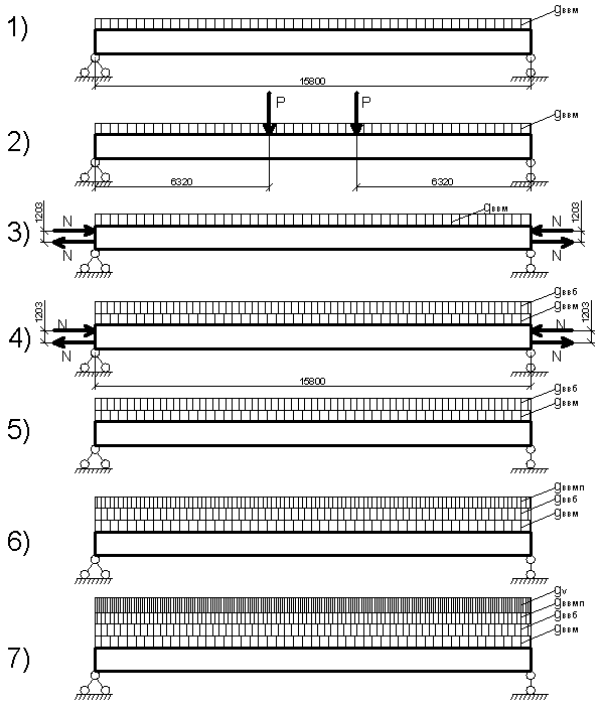

Рис. 5. Розрахункові схеми та етапи навантаження сталезалізобетонної балки

Fig. 5. Calculation schemes and stages of loading a steel-reinforced concrete beam

У табл. 1 наведено результати розрахунків, використаних у програмному комплексі ANSYS, на рис. 6 показано напруження у верхньому поясі середини металевої балки в разі розрахунку моделі методом скінченних елементів, а на рис. 7 – аналогічні напруження нижнього пояса. Епюри напружень і результати розрахунків моделі методом скінченних елементів та аналітичним методом показано на рис. 8 і 9 (у дужках наведено результати аналітичного розрахунку).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2022/265333
© М. М. Попович, С. В. Ключник, 2022

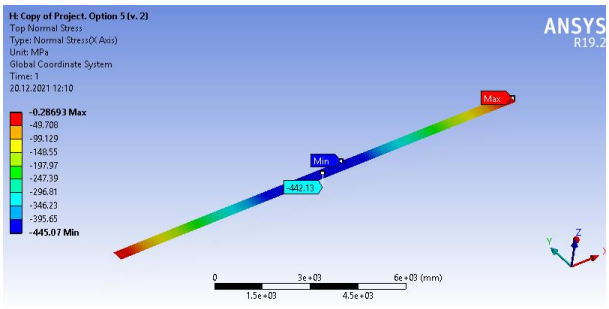

Рис. 6. Напруження верхнього пояса металевого двотавра за навантаження № 3, МПа

Fig. 6. Stress of the upper belt of the metal I-beam when loading no. 3, MPa

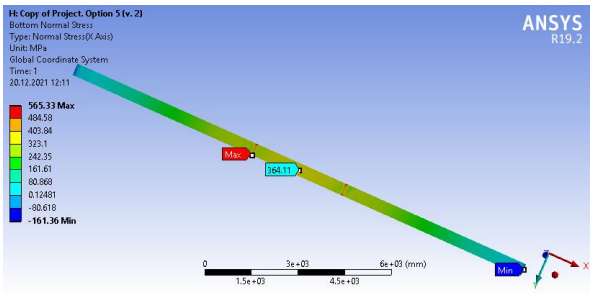

Рис. 7. Напруження нижнього пояса металевого двотавра за навантаження № 3, МПа

Fig. 7. Stress of the lower belt of the metal I-beam when loading no. 3, MPa

Таблиця 1

Результати розрахунків у програмному комплексі ANSYS

Table 1

Results of calculations in the ANSYS software complex

№ навантаження	Напруження в середині балки, МПа				Переміщення, мм
	метал		бетон		
	верх	низ	верх	низ	
1	–5,75	5,54			–1,38
2	–434,4	357,5			–8,45
3	–442,13	364,11			–8,78
4	–445,6	377,32	–2,07	3,36	–7,05
5	–335,5	289,1	7,3	–11,5	–7,4
6	–406,1	308,1	5,4	–8,4	–8,5
7	–442,6	372,9	–1,5	2,6	–10,4

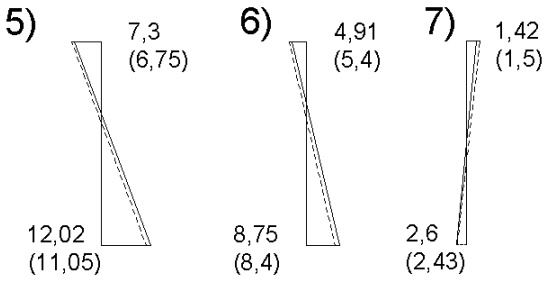

Рис. 8. Напруження в середині балки за бетоном, МПа

Fig. 8. Stress in the middle of the beam on concrete, MPa

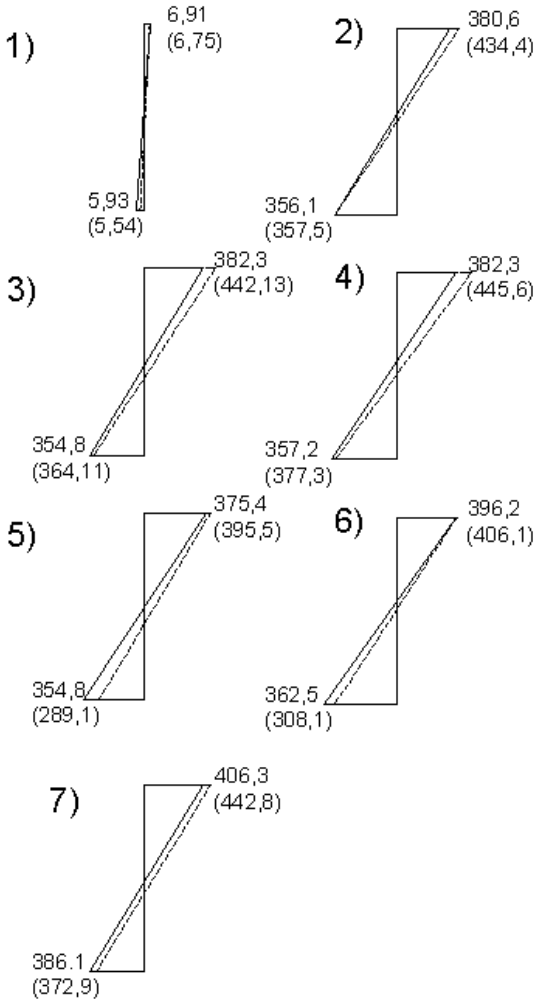

Рис. 9. Напруження у верхній фібрі верхнього пояса та нижній фібрі нижнього пояса в середині металевої балки, МПа

Fig. 9. Stress in the upper fiber of the upper belt and the lower fiber of the lower belt in the middle of the metal beam, MPa

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2022/265333
© М. М. Попович, С. В. Ключник, 2022

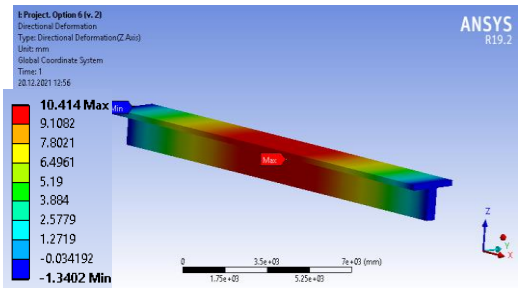

Рис. 10. Переміщення балки
під навантаженням № 7, мм

Fig. 10. Movement of the beam under load no. 7, mm

Із діаграм напружень за бетоном, показаних на рис. 8, видно, що напружені стани блока прогонової будови за розрахунковими величинами й напруженнями, отриманим за допомогою методу скінченних елементів, у моделі рівні або близькі. Це свідчить про достатньо високе наближення програмної моделі до реальної конструкції, а отримані результати дають можливість застосувати принцип виготовлення прогонових будов із частковим попереднім напруженням перерізу для забезпечення необхідної міцності й тріщиностійкості.

За напруженнями верхнього й нижнього поясів металевого двотавра (рис. 9) результати мають розбіжність від 0,4 до 18 %, що свідчить про недостатню точність аналітичного методу розрахунку та необхідність більш ретельного підбору перерізу сталевого двотавра (у нашій роботі такого підбору не виконано).

Наукова новизна та практична значимість

У роботі досліджено напружено-деформований стан сталезалізобетонних балок залізничної прогонової будови з урахуванням попереднього напруження бетону. Запропоновано метод виготовлення сталезалізобетонної балки, що забезпечує попереднє напруження залізобетону за рахунок вигину сталевої двотаврової балки.

У результаті розрахунків виявлено, що конструкція, виготовлена вказаним методом, має більшу жорсткість порівняно із залізобетонними або металевими балками. Висота балки може бути меншою за залізобетонну або металеву прогонову будову. Ці обставини є суттєвими для залізничних мостів, особливо для швидкісного руху.

Висновки

Аналіз результатів показав, що попередній вигин металевої балки можна використовувати для створення попереднього напруження залізобетонної балки, що поліпшує працездатність сталезалізобетонних прогонових будов,

Виготовлення сталезалізобетонних прогонових будов із попереднім вигином сталевої двотаврової балки для попереднього напруження бетону має відповідні переваги перед балковими розрізними залізобетонними та металевими прогоновими будовами, а саме:

– можна виготовляти конструкції довжиною більше ніж 40 м та вагою, яку забезпечують вантажопідйомні механізми;

– можна виготовляти конструкції з найменшою будівельною висотою за рахунок введення нижнього пояса;

– конструкція, виготовлена вказаним методом, має більшу жорсткість, що важливо для швидкісного руху по залізничних мостах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи* [Чинний від 2009–11–11]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 83 с.
2. Гернич М. В., Ключник С. В., Співак Д. С. Сталезалізобетонні прогонові будови мостів для постконфліктного відновлення зруйнованої транспортної інфраструктури. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2021. № 19. С. 28–37. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233872
3. Каплін Р. Б. Сучасні сталезалізобетонні прогонові будови мостів малих і середніх прогонів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2020. № 193. С. 25–34.
DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229530

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2022/265333
© М. М. Попович, С. В. Ключник, 2022

4. Коваль П. М., Бабяк І. П., Ковальчик Я. І., Горба М. Б. Збірні залізобетонні попередньо напружені балки для автодорожніх мостів. *Електронний науковий архів Львівської політехніки*. 2013. № 755. С. 184–188.
5. Корнеев М. М. *Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию*. Киев, 2003. 547 с.
6. Риго Г. Сталежелезобетонные пролётные строения с предварительным выгибом стальной балки (Бельгия). *Мостостроение мира*. 2004. № 1–2. С. 50–56.
7. Belentsov Yu. A., Smirnova O. M. Influence of acceptable defects on decrease of reliability level of reinforced concrete structures. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. Iss. 11. P. 2999–3005.
8. Kliuchnyk S., Ovchynnykov P. Study of Railway Steel Bridges' Behaviour in Order to Identify the Causes of Their Defects. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022. Vol. 19. Iss. 3. P. 77–88. DOI: https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.7
9. Qian J., Zhang H., Yang M., Huang Q., Tian L. Restudy of calculation method of cross-section bending capacity for preflex composite beams | [预弯组合梁截面抗弯承载力计算方法的再研究]. *Harbin Gongye Daxue Xuebao / Journal of Harbin Institute of Technology*. 2022. Vol. 54. Iss. 3. P. 65–73. DOI: https://doi.org/10.11918/202101124
10. Veselov V. Application of Steel-Concrete Beam Structures in Transport Construction. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 402 LNNS. P. 269–277. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_30
11. Yao G., Xiong X. Quantitative study of deformation-based performance index for prestressed steel reinforced concrete flexural beams | [预应力型钢混凝土受弯梁的变形性能指标量化研究]. *Jianzhu Jiegou Xuebao / Journal of Building Structures*. 2022. Vol. 43. Iss. 6. P. 284–293. DOI: https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0784

M. M. POPOVYCH[1], S. V. KLIUCHNYK[2*]

[1]Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (0562) 33 58 12, e-mail popovich.n.m@ukr.net, ORCID 0000-0003-1790-3110
[2*]Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (0562) 33 58 12, e-mail ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Features of the Stressed-Strain State of a Steel-Reinforced-Concrete Span Structure with Preliminary Bending of a Steel Beam

Purpose. The authors aim to determine the features of the operation of a steel-reinforced concrete span structure with beams reinforced with an I-beam, with their pre-stressing using the bending of a steel I-beam. **Methodology.** To manufacture a steel-reinforced concrete span structure, it was proposed to reinforce an I-beam with a camber, which is then leveled with the help of applied external loads. For practical convenience, the vertical external forces are replaced by horizontal forces that keep the metal I-beam in a deformed state and in this state it is concreted. After the concrete strength development, the external forces are removed and the metal I-beam creates the pre-stressing of the concrete. **Findings.** When determining stresses, checking calculations by analytical method and the method of modeling with the help of the ANSYS program were used. The stress diagrams along the lower and upper fibers of a metal I-beam and stresses in concrete in the upper and lower zones of the beam were constructed. The analysis of the results showed that the pre-bending of a metal beam can be used to create a pre-stressing, which improves the performance of steel-reinforced concrete span structures, increases their rigidity and allows using of such a structure to increase the balks of railway and highway bridges. **Originality**. In the paper, a study of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams of the railway span structure was carried out, taking into account the pre-stressing of the concrete. A method of manufacturing a steel-reinforced concrete beams is proposed, which provides pre-stressing of the reinforced concrete due to the bending of a steel I-beam. **Practical value.** As a result of the calculations, it was found that the structure, when manufactured by the specified method, has greater rigidity compared to reinforced concrete or metal beams. The height of the beam can be lower compared to reinforced concrete or metal span structures. These circumstances are essential for railway bridges, especially for high-speed traffic ones.

Keywords: steel-reinforced-concrete span structure; camber; metal beam; stress diagram; stressed-strain state; combined model

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2022/265333
© М. М. Попович, С. В. Ключник, 2022

REFERENCES

1. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy, 83 DBN V.1.2-15:2009*. (2009). (in Ukrainian)
2. Hernich, M., Klutchnik, S., Spivak, D. (2021). Composite reinforced concrete bridge girders for post-conflict reconstruction of the destroyed transport infrastructure. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice, 19*, 28-37. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233872 (in Ukrainian)
3. Kaplin, R. (2020). Modern steel-concrete span structures of small and medium-span bridges. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport, 193*, 25-34. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229530 (in Ukrainian)
4. Koval, P. M., Babiak, I. P., Kovalchyk, Ya. I., & Horba, M. B. (2013). Zbirni zalizobetonni poperedno napruzheni balky dlia avtodorozhnikh mostiv. *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository, 755*, 184-188. (in Ukrainian)
5. Korneev, M. M. (2003). *Stalnye mosty. Teoreticheskoe i prakticheskoe posobie po proektirovaniyu*. Kiev. (in Russian)
6. Rigo, G. (2004). Stalezhelezobetonnye proletnye stroeniya s predvaritelnym vygibom stalnoy balki (Belgiya). *Mostostroenie mira, 1-2*, 50-56. (in Russian)
7. Belentsov, Yu. A., & Smirnova, O. M. (2018). Influence of acceptable defects on decrease of reliability level of reinforced concrete structures. *International Journal of Civil Engineering and Technology, 9*(11), 2999-3005. (in English)
8. Kliuchnyk, S., & Ovchynnykov, P. (2022). Study of Railway Steel Bridges' Behaviour in Order to Identify the Causes of Their Defects. *Acta Polytechnica Hungarica, 19*(3), 77-88. DOI: https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.7 (in English)
9. Qian, J., Zhang, H., Yang, M., Huang, Q., & Tian, L. (2022). Restudy of calculation method of cross-section bending capacity for preflex composite beams | [预弯组合梁截面抗弯承载力计算方法的再研究]. *Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology, 54*(3), 65-73. DOI: https://doi.org/10.11918/202101124 (in English)
10. Veselov, V. (2022). Application of Steel-Concrete Beam Structures in Transport Construction. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 402 LNNS, pp. 269-277). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_30 (in English)
11. Yao, G., & Xiong, X. (2022). Quantitative study of deformation-based performance index for prestressed steel reinforced concrete flexural beams | [预应力型钢混凝土受弯梁的变形性能指标量化研究]. *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures, 43*(6), 284-293. DOI: https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0784 (in English)

Надійшла до редколегії: 12.11.2021
Прийнята до друку: 14.03.2022

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2022/265333
© М. М. Попович, С. В. Ключник, 2022