

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.872.042

Ю. М. ГОРБАТЮК^{1*}, К. І. СОЛДАТОВ^{2*}, М. С. ПАПКО^{3*}

^{1*}Каф. «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (093) 339 41 28, ел. пошта KVP@DSST.gov.ua

^{2*}Каф. «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (096) 527 26 01, ел. пошта KVP@DSST.gov.ua

^{3*}Дніпропетровський завод мостових залізобетонних конструкцій, вул. Молодогвардійська, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49022, тел. +38 (096) 826 74 19, ел. пошта player_m@list.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ НАСКРІЗНИХ ДВОТАВРІВ ДЛЯ ПРОГОНОВИХ БУДОВ НАПЛАВНИХ МОСТІВ

Мета. У публікації наведено результати розрахунків прогонових будов для наплавних мостів із наскрізних двотаврів. Мета дослідження – проаналізувати придатність прогонових будов із наскрізних двотаврів для наплавних мостів мінімальної ваги під навантаження, які передбачені нормами на проектування сучасних наплавних мостів. **Методика.** У роботі використано порівняльний метод, аналітичні методи розрахунку мостів (методика ліній впливу), розрахунки на міцність, витривалість, максимальні дотичні напруження. **Результати.** Сучасні навантаження для розрахунку мостів на 75 % більші, ніж ті, на які запроєктовані прогонові будови наплавного мосту з майна НЗМ-56. Застосування наскрізних двотаврів, утворених із двотавра № 70 (висота наскрізного 104 см), зменшує площу перерізу в послабленому місці, але практично не впливає на міцність та витривалість матеріалу. Застосування наскрізних двотаврів для прогонових будов наплавних мостів дає економію металу до 22 %, тобто кожна п'ята прогонова будова буде виготовлена із зекономленого металу. Економія на кожній прогоновій будові, наприклад СРП-33.6 – 263 тис. грн. (з урахуванням ціни на 1 тонну готового виробу 29 тис. грн.). **Наукова новизна.** Дослідження дозволяє зробити новий крок в економії матеріалу та використанні наскрізних двотаврових балок для прогонових будов у цілому. **Практична значимість.** Отримані в результаті дослідження дані дозволили зробити ряд висновків, що сприяють детальнішому ознайомленню та більш практичному використанню наскрізних двотаврів для прогонових будов наплавних мостів.

Ключові слова: залізничні мости; наплавні мости; наскрізні двотаври; прогонові будови; економія металу; прогрес мостобудівництва

Вступ

Одним із прогресивних напрямків підвищення ефективності двотаврових профілів прокату є створення балок з перфорованою стінкою. Такі балки утворюються шляхом розрізу стінки двотавра по зигзагоподібній лінії за допомогою газорізки чи методом пресування. Розрізані частини балки з'єднуються в місцях примикання виступів за допомогою зварювання, утворюючи суцільні перемички. Виходить своєрідна конструктивна форма – двотавр з отворами в стінці.

В технічній літературі такий двотавр отримав декілька назв: двотавр з перфорованою стінкою, двотавр з розвиненим перетином, наскрізний двотавр. В мостобудуванні є поодинокі приклади використання наскрізних двотаврів як основних несучих конструкцій за умови зниження власної ваги конструкцій та економії металу.

Мета

Зазначимо, що несуча здатність наскрізних двотаврів за даними досліджень у 1,3...1,5 рази

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

вище несучої здатності вихідного за рахунок того, що висота першого збільшується приблизно в 1,5 разу. Мета роботи дослідити придатність прогонових будов з наскрізних двотаврів для наплавних мостів мінімальної ваги під навантаженням, які передбачені нормами проектування сучасних наплавних мостів.

Методика

В окремих публікаціях наскрізні двотаври рекомендують для застосування як прогонові будов тимчасових мостів, зокрема на автомобільних магістралях [4–6, 7]. На рис. 1 наведені приклади застосування наскрізних двотаврів. Як прогонові будови тимчасових збірно-розбірних мостів застосовують наскрізні двотаври, виготовлені з прокатних балок № 55, 60, 70, 80, 90, 100 типів Б і Ш. Методика розрахунку спроектованих по висоті наскрізних двотаврів розроблені «ЦНИИПроектстальконструкцией» і внесені в нормативний документ СНиП П-23-81 [8–10].

Під час проектування прогонових будов з наскрізних двотаврів потрібно дотримуватись основних вимог, які стосуються наплавних мостів, а саме [7]:

– висота наскрізного двотавра не повинна перевищувати 1,5 висоти вихідного $H_c \leq 1,5 H_n$;

– відношення висоти наскрізного двотавра до розрахункової довжини прогону приймається у межах $H_c / l = 0,07 \dots 0,05$;

– забезпечення місцевої стійкості вільної кромки тавру у перетині 1–1 в стислій зоні для залізничних мостів за умови $h - (t + r) \leq 10s$;

– забезпечення стійкості стінки в перемичках за допомогою постановки парних чи однобічних вертикальних ребер жорсткості в кожній перемичці;

– забезпечення довжини зварених перемичок (необхідної конструктивно і достатньої для сприйняття поперечної сили Q) за умови $a \geq \frac{H_c - H_n}{2}$;

– кут між похилою лінією розрізу і віссю балки повинен бути у межах $\alpha = 40^\circ \dots 70^\circ \approx 60^\circ$;

– коефіцієнт зниження несучої здатності стиснутого пояса φ , обчислюється аналогічно розрахунку балок суцільного перетину [7];

– забезпечення місцевої стійкості вільної кромки тавру у перетині 1–1 в стислій зоні для залізничних мостів за умови $h - (t + r) \leq 10s$,

для автодорожніх – $h - (t + r) \leq 15s$;

– розрізи можуть бути симетричними і несиметричними відносно середини вихідного двотавра;

– двотаври з перфорованою стінкою можна компоувати із заготовок, отриманих із різних вихідних двотаврів: половинка із більшого двотавра встановлюється в стислій зоні і може бути із менш міцної сталі $R_y = 210 \dots 260$ МПа, а половинка із меншого двотавра встановлюється в розтягнутій зоні і приймається із більш міцної сталі $R_y = 320 \dots 360$ МПа. Завдяки такій компоувці легше забезпечити місцеву стійкість стінок стиснутих поясів – таврів;

– товщина стінки S повинна складати $\frac{1}{75} \dots \frac{1}{95}$ від висоти H_c .

Двотаври з перфорованою стінкою забезпечують 20...30 % економії металу порівняно з прокатними двотаврами та дешевші останніх на 10...18 %. За трудомісткістю виготовлення вони на 25...35 % ефективніші, ніж зварені двотаври, за рахунок скорочення операцій обробки та об'єму зварювання. Фігурна розрізка двотавра, стиківка його частин та встановлення ребер жорсткості хоча певною мірою і знижують ефект економії металу, та все ж є позитивними. З попередніх розрахунків видно, що момент інерції балок з наскрізних двотаврів збільшується у 2,2...2,3 разу порівняно з двотавровими балками з суцільною стінкою.

Завдяки цим якостям у поєднанні з компактністю, транспортабельністю і пристосованістю до автоматизованого виготовлення вони є конкурентноспроможними з ґратчастими конструкціями і широко застосовуються як балки перекриття і кроквяні балки.

Прокатні двотаврові балки за ТУ 14-2-24-72 [13] нормальні (Б) та широкополічкові (Ш) з паралельними полічками з сталей класів С 245 та С 345 повною мірою підходять для компоування наскрізних двотаврів – моносталевих і бісталевих, із симетричними і несиметричними перетинами.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО



Рис. 1. Приклади застосування наскрізних двотаврів в будівництві та мостобудуванні
 Fig. 1. Examples of open double T-beams application in construction and bridge engineering

У цій роботі обґрунтовується можливість застосування наскрізних двотаврів в мостобудуванні з точки зору економії металу, оскільки вартість металу з часом значно зростає. Економія навіть 5...7 % металу на кожній прогоновій будові загалом має суттєвий ефект. При цілеспрямованому компонуванні наскрізних двотаврів з використанням прокатних двотаврів різних типів, номерів прокату і марок сталей можна досягти повної вичерпної працездатності матеріалу і конструкції, а також максимальної економії.

З метою повного використання вихідного двотавра при його розпуску необхідно дотримуватись таких рекомендацій: для однопрогонових балок більш економічно застосовувати наскрізні двотаври з двох марок сталей (верхню частину з двотавра звичайної маловуглецевої сталі з більш товстою стінкою, а нижню частину з двотавра більш міцної сталі з більш тонкою стінкою). Наприклад, для металевої прогонової будови верхній стиснутий пояс за умови забезпечення його загальної стійкості можна прийняти з двотавра типу Ш, сталі 16Д, а нижній розтягнутий пояс – з балки типу Б, сталі 15ХСНД, а для розрізної прогонової бу-

дови з залізобетонною плитою проїжджої частини, включеної в роботу конструкції, верхній пояс повинен бути мінімального перетину з балок типу Б сталі 16Д, а нижній – максимально розвиненим типу Ш зі сталі 15ХСНД або 10ХСНД.

Типи розрізання балок наведені на рис. 2. Вузли опирання балок з перфорованою стінкою наведені на рис. 3. Існує поточна технологія виготовлення перфорованих двотаврів з використанням багатоопераційного маніпулятора.

Продуктивність такої поточної лінії складає 45...50 тис. м перфорованих балок за рік. Але при всіх позитивних моментах, область застосування балок з перфорованою стінкою обмежена з таких причин [1, 3, 12].

1. Робота поясів балок з перфорованою стінкою ускладнюється тим, що вони мають додатковий вигин від поперечних сил у межах отворів. Граничний стан настає тоді, коли пластичність пронизує переріз поясу, причому при поперечному вигині можуть з'явитися шарніри пластичності в чотирьох кутах отворів. Ці шарніри виникають і при складному напруженому стані в поясах.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

2. Прогини балок з перфорованою стінкою перевищують на 5...40 % прогини, обчислені, як в звичайних балках, з врахуванням моменту інерції у послабленому перерізі.

3. Втрата місцевої стійкості перемичок відбувається в основному від зсуву. Перемичка при втраті місцевої стійкості закручується. Розтягнута частина залишається в площині стінки, а стисла вигинається із площини. В зв'язку з тим, що стінка одного з таврових поясів стиснута або стиснуто-вигнута, вона також може втратити місцеву стійкість, після чого вичерпується несуча здатність всієї балки.

Перш за все виконані розрахунки моментів інерції для прокатних двотаврових балок № 55Б, 60Б, 70Б, 80Б, 90Б, 100Б та їх порівняння з перфорованими двотаврами, що з них утворені. Дані зведено у табл. 1, з якої видно, що перфо-

ровані балки, утворені з прокатного двотавра, не збільшуючись у вазі, мають в 2,1...2,3 рази більший момент інерції [1, 3, 12].

У табл. 1 позначено: H_n – висота прокатного двотавра, см; B – ширина полки, см; s – товщина вертикального листа, см; t – товщина горизонтального листа, см; $F_{\text{оп}}$ – площа перерізу, см²; I_x – момент інерції, см⁴; H_c – висота, см; H – висота вертикального листа у місці отвору, см; $h_0/2$ – відстань між центрами ваги нижньої та верхньої частини, см; b_n – ширина ребер жорсткості, см; z – відстань від верхньої кромки горизонтального листа до центра ваги частини, см; I_{xm} – момент інерції перерізу з отвором, см⁴; F_{mn} – площа послабленого перерізу, см²; I_x – момент інерції суцільного перерізу, см⁴; I_x/I_x – відношення моментів інерції вихідного двотавра та утвореного з нього наскрізного.

Таблиця 1

Порівняльні величини прокатних та перфорованих двотаврів

Table 1

Comparative values of roll and perforated double T-beams

№ вихідного двотавру	Розраховані величини прокатних двотаврів					
	H_n , см	B , см	s , см	t , см	$F_{\text{оп}}$, см ²	I_x , см ⁴
55Б	55,0	22,0	0,90	1,14	97,6	47 370
60Б	60,0	23,5	1,00	1,24	116,0	66 170
70Б	70,0	27,5	1,10	1,60	161,0	130 270
80Б	80,0	30,0	1,20	1,70	194,0	201 310
90Б	90,0	32,5	1,35	1,78	232,0	297 810
100Б	100,0	35,0	1,45	2,00	279,0	443 090

Закінчення табл. 1

End of table 1

№ вихідного двотавру	Розраховані величини наскрізного двотавра								
	H_c , см	H , см	$h_0/2$, см	b_n , см	z , см	I_{xm} , см ⁴	F_{mn} , см	I_x , см ⁴	I_x/I_x
55Б	80,00	15,00	36,94	21,10	3,06	671,0	37,55	103 814,0	2,2
60Б	90,00	15,00	41,97	22,50	3,03	746,6	43,00	153 012,3	2,3
70Б	104,76	17,62	49,06	26,40	3,32	1 362,9	61,38	298 211,7	2,3
80Б	120,00	20,00	56,14	28,80	3,86	2 160,2	73,00	464 470,6	2,3
90Б	130,00	25,00	59,72	31,15	5,28	4 600,4	89,00	643 971,3	2,2
100Б	150,00	25,00	69,97	33,55	5,03	5 022,9	103,25	1 020 924	2,3

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

З метою обґрунтування можливості застосування перфорованих двотаврів як балок проїжджої частини наплавних мостів [11] наводиться порівняння геометричних характеристик та напружень у існуючих балках проїжджої частини (довжини прогонових будов 12,35 м, 15,9 м та 18,0 м) з перфорованою та суцільною стінкою.

Виходячи із конструктивної схеми, розрахункова схема для прогонової будови прийнята у вигляді однопрогонової балки на жорстких опорах, проліт якої дорівнює довжині існуючої балки. Жорстке спирання передбачає, що балка просто просідає на якусь величину на пружних опорах (понтонів), а потім працює як звичайна балка.

Перш за все виконані розрахунки існуючої балки прогонової будови $l = 12,35$ м з суцільною стінкою на сучасні навантаження. При цьому висота балки на цьому етапі є незмінною (104 см), а додатково досліджена можливість: застосування більш міцної сталі (15ХСНД та 10ХСНД), збільшення моменту інерції за рахунок збільшення товщини вертикального та горизон-

тальних листів. Аналогічні розрахунки виконані і для прогонових будов $l = 16,47$ м та 18,53 м.

Для визначення зусиль (згинального моменту M та поперечної сили Q) побудовані лінії впливу зусиль для згинального моменту M (середина прольоту балки) та для поперечної сили Q (переріз на опорі). До постійного навантаження відносяться: власна вага балки ($q_{в.в.}$) та вага мостового полотна ($q_{м.п.}$), а до тимчасового – вертикальне навантаження від рухомого складу (q_m). Кожне з цих навантажень приймається у вигляді рівномірно розподіленого навантаження інтенсивністю (нормативною та розрахунковою) відповідно до вимог [4]. Інтенсивність тимчасового вертикального навантаження визначається за формулою $q_m^H = 0,5 \nu K$, де ν – інтенсивність тимчасового вертикального навантаження при $K = 1$, кН/м; K – клас тимчасового навантаження, $K = 14$.

Дані для розрахунку зведені у табл. 2.

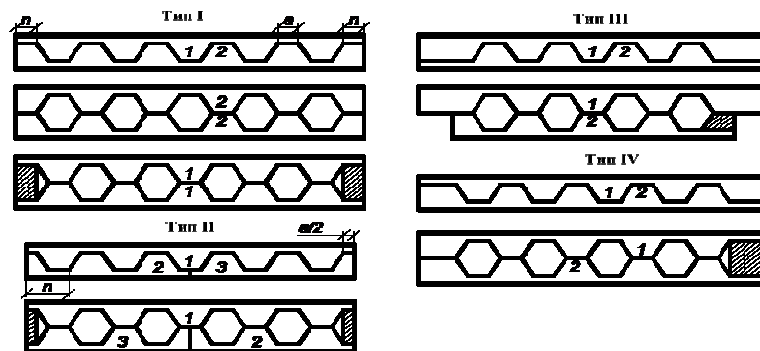


Рис. 2. Типи розрізання стінки двотавра: тип I – III – симетричний; тип IV – несиметричний

Fig. 2. Types of cutting the double T-beams: types I – III are symmetrical; type IV is not symmetrical

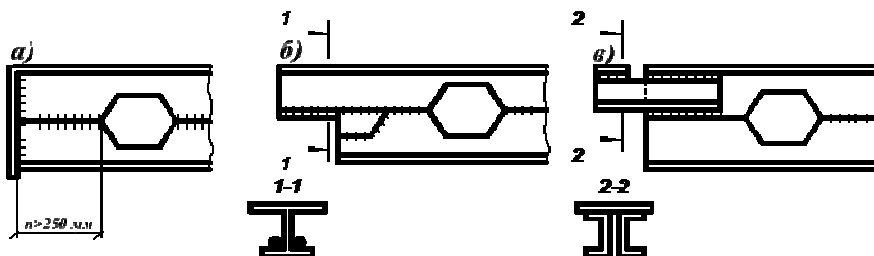


Рис. 3. Рекомендовані вузли спирання балок: а – опорна ділянка; б – випуск верхнього елемента; в – консоль із двох швелерів

Fig. 3. Recommended nodes of beams seat а – support section; б – outlet of upper element; в – console with two channels

Основні вихідні параметри для розрахунку прогонових будов

The main output parameters to calculate spans

Вихідні параметри	Розрахункові величини				
Повна та розрахункова довжина балки, м	12,35 (11,70)	12,35 (11,70)	16,47 (15,90)	16,47 (15,90)	18,53 (18,00)
Висота, см	104	150	104	150	150
Матеріал (сталь)	M16C10XCHД	10XCHД	10XCHД	15XCHД	10XCHД
$\omega_{л.в.M_{1/2}}, M^2$	7,11	7,11	31,6	31,6	40,5
$\omega_{л.в.M_{1/4}}, M^2$	12,83	12,83	23,7	23,7	30,38
$\omega_{л.в.Q_0}, M$	5,85	5,85	7,95	7,95	9,0
$^-\omega_{л.в.Q_{1/4}}, M$	0,37	0,37	0,5	0,5	0,56
$^+\omega_{л.в.Q_{1/4}}, M$	3,29	3,29	4,47	4,47	5,06
$\sum \omega_{л.в.Q_{1/4}}, M$	2,92	2,92	3,97	3,97	4,5
$q_{в.в}^H, кН/м$	2,54	2,54	3,49	3,49	3,48
$q_{м.п}^H, кН/м$	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45
$v (\alpha = 0,5), кН/м$	14,77	14,77	13,73	13,73	13,3
$v_1 (\alpha = 0), кН/м$	16,88	16,88	15,69	15,69	15,19
γ_{fn}	1,265	1,265	1,252	1,252	1,246
$1 + \mu$	1,432	1,432	1,392	1,392	1,375
$M_{max}^m, кНм$	3 491	3 491	5 569	5 569	6 898
$Q_{max}^m, кН$	1 350	1 350	1 591	1 591	1 737
$v_2 (\alpha = 0,5), кН/м$	15,83	15,83	14,71	14,71	14,24
ϵ	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$M_{max}^e, кНм$	1 641	1 641	2 776	2 776	3 450
$M_{min}^e, кНм$	86,4	86,4	159,9	159,9	231,7

Розрахункові величини (для розрахунку на міцність та стійкість) максимального згинального моменту та поперечної сили визначаються за формулами (1) та (2)

$$M_{max}^m = \left[(q_{в.в}^H + q_{м.п}^H) \gamma_{fn} + \frac{vK}{2} \gamma_{fn} (1 + \mu) \right] \omega_{л.в.M_{1/2}} \quad (1)$$

$$Q_{max}^m = \left[(q_{в.в}^H + q_{м.п}^H) \gamma_{fn} + \frac{v_1 K}{2} \gamma_{fn} (1 + \mu) \right] \omega_{л.в.Q_0} \quad (2)$$

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

де γ_{fn} – коефіцієнт надійності до постійного навантаження, дорівнює 1,1; γ_{fnt} – коефіцієнт надійності до тимчасового навантаження, визначається за формулою $\gamma_{fnt} = 1,3 - 0,03 \lambda$; λ – довжина завантаження лінії впливу (дорівнює розрахунковій довжині балки l), $(1 + \mu)$ – динамічний коефіцієнт, який визначається за формулою $1 + \mu = 1 + 18 / (30 + \lambda)$. При розрахунках на витривалість враховуються нормативні значення постійних навантажень, а тимчасове навантаження приймається з введенням понижуючих коефіцієнтів: $1 + \mu = 1 + 2 / 3 \cdot 18 / (30 + \lambda)$; ϵ – коефіцієнт, що визначається за даними табл. 2 [4] залежно від довжини лінії впливу λ .

$$M_{\max}^e = \left[(q_{6.6}^n + q_{m.n}^n) + \frac{v_2 K}{2} \epsilon \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \right] \omega_{л.в.М_{1/4}}; \quad (3)$$

$$M_{\min}^e = (q_{6.6} + q_{m.n}) \omega_{л.в.М_{1/4}}, \quad (4)$$

Подальші розрахунки для компактності зведені у табл. 3 і в ній наведені дані перевірок означених вище балок на міцність за нормальними напруженнями, на витривалість за нормальними напруженнями, за дотичними напруженнями та стінки балки при сумісній дії нормальних та дотичних напружень. Конструкція балки з суцільною стінкою наведена на рис. 4, а з перфорованою – на рис. 5.

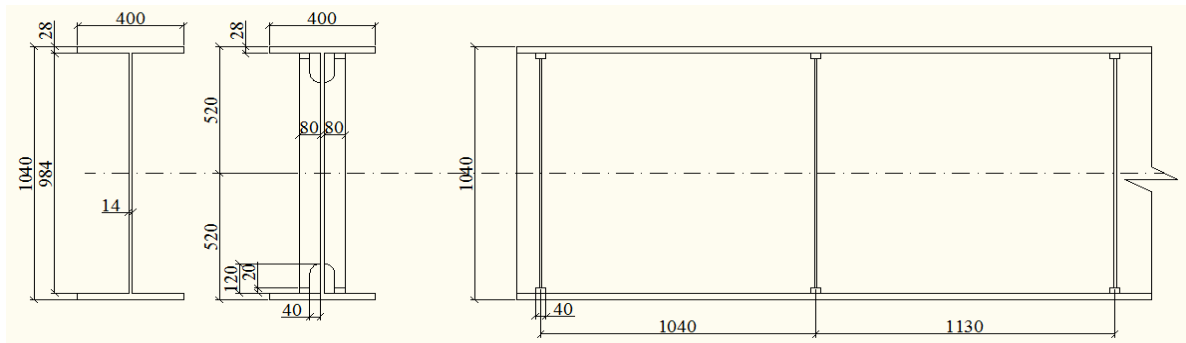


Рис. 4. Поперечний переріз поздовжньої балки з суцільною стінкою (існуюча конструкція прогонових будов майна НЗМ 56) висотою 104 см

Fig. 4. Cross-section of the longitudinal beam with a solid wall (existing spans design of NZM 56 property) height 104 cm

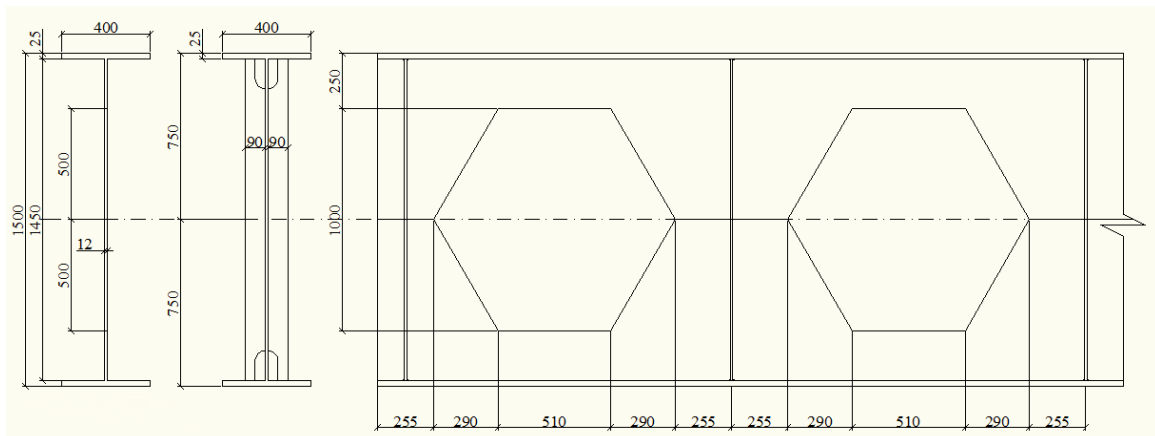


Рис. 5. Конструктивна схема балки з наскрізного двотавра висотою 150 см, утвореного з двотавра з суцільною стінкою висотою 104 см

Fig. 5. Structural diagram of the beam with a through double T-beam height 150cm, formed of double T-beam with a solid wall height 104 cm

Згідно з вимогами п. 4.24 [4] перевірка балок за нормальними напруженнями виконується за формулою

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$$\sigma = \frac{M_{\max}^m}{W_{\text{нт}} \chi} \leq R_y m, \quad (5)$$

де χ – коефіцієнт, який враховує часткове допущення в балках пластичних деформацій.

Оскільки під час застосування сталі М16С умова при розрахунку на міцність не виконується, можливо застосування сталі з більшою міцністю – 15ХСНД (умова у цьому випадку виконується).

Перевірка перерізу балки за нормальними напруженнями на витривалість виконується за формулою

$$\sigma_{\max,ef}^e = \frac{M_{\max}^e}{W_{\text{нт}} \chi_3} \leq \gamma_w R_y m, \quad (6)$$

де додатково вводиться коефіцієнт зменшення розрахункового опору сталі при розрахунках на витривалість γ_w ,

$$\gamma_w = \frac{1}{\zeta v [(\alpha \beta + \delta) - (\alpha \beta - \delta) \rho]} \leq 1 \quad (7)$$

де ξ – коефіцієнт, який для залізничних мостів рівний 1; v – коефіцієнт, що залежить від довжини завантаження лінії впливу λ (при $\lambda \leq 22$ м $v = \gamma - \xi \cdot \lambda$, а величини ξ та v приймаються за табл. 4.31 [4]), α та δ – коефіцієнти, які залежать від марки сталі (табл. 4.30 [4]); β – ефективний коефіцієнт концентрації напружень у металі, який при розрахунках поздовжньої балки зі сталі М16С та 15ХСНД приймається 1,3; ρ – коефіцієнт асиметрії циклу змінних напружень.

Перевірка перерізу балки за максимальними дотичними напруженнями виконується в опорних перерізах, де діє максимальна поперечна сила ($Q_{\max}^m = Q_o$). Величина дотичних напружень згідно з п. 4.28 [4] повинна відповідати умові

$$\tau = \frac{Q_{\max}^m S_{\text{оп}}^{nn}}{\chi_2 I_{\text{оп}} t_w} \leq R_s m / \gamma_m, \quad (8)$$

де додатково введені такі позначення: Q_{\max}^m – поперечна сила для опорного перерізу балки, кН; $S_{\text{оп}}^{nn}$ – статичний момент половини перерізу балки відносно нейтральної осі, см³; t_w – товщина стінки балки, см; χ_2 – коефіцієнт, що ви-

значається залежно від мінімального та максимального дотичних напружень у перерізі стінки (п. 4.28 [4]); $R_s = 0,58 \cdot R_y$ – розрахунковий опір сталі на зсув, МПа; $m = 0,9$ – коефіцієнт умов роботи; γ_m – коефіцієнт надійності за матеріалом (п. 4.5 [4]) (для сталі 15ХСНД – 1,165, для М16С – 1,090).

Перевірка стінки балки при сумісній дії нормальних та дотичних напружень.

Згідно з п. 4.29 [4] ця перевірка виконується за формулою:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \tau_{xy}^2} \leq \gamma' R_y m, \quad (9)$$

де σ_x – нормальні (додатні при стисненні) напруження в точці (X, Y), паралельні осі балки; σ_y – нормальні напруження в тій же точці стінки балки, перпендикулярні осі балки; $\tau_{xy} \approx \tau_m$ – середні дотичні напруження в стінці балки; γ' – коефіцієнт, який приймається рівним 1,1; R_y та m – розрахунковий опір сталі та коефіцієнт умов роботи.

Зазначені нормальні та дотичні напруження в стінці балки визначаються за формулами:

$$\sigma_x = \frac{M_x^m}{I_{\text{нт}}} y; \quad \sigma_y = \frac{p}{t_w}; \quad \tau_{xy} = \frac{Q_x^m S_{\text{оп}}^n}{I_{\text{оп}} t_w}, \quad (10)$$

в яких M_x^m та Q_x^m – величини згинального моменту та поперечної сили (як перше наближення) можна взяти для перерізу балки у чверті прольоту (табл. 2), $y = 75$ см.

Визначення розмірів ребер жорсткості та їх розміщення виконується з умов забезпечення місцевої стійкості, а також з конструктивних міркувань для прикріплення поперечних зв'язок. Ширина ребер жорсткості визначалась за формулою $b_h \geq t_w / 30 + 40$ мм, а товщина – $t_s = 2 b_h \sqrt{R_y / E}$.

Для обґрунтування висновків на основі виконаних розрахунків визначено перехідний коефіцієнт відношення нормативного тимчасового вертикального навантаження С14 (згідно з ДБН) до нормативного тимчасового вертикального навантаження Н6 (на яке розраховані прогонові будови майна НЗМ 56).

Результати розрахунків балок

Table 3

The results of beams calculations

Тип балки	Суцільна стінка			Перфорована			
Довжина, м	12,35 (11,7)	12,35 (11,7)	12,35 (11,7)	12,35 (11,7)	16,47 (15,9)	16,47 (15,9)	18,53 (18,00)
Висота, см	104,0	104,0	104,0	104,0	150,0	150,0	150,0
Сталь	M16C	10XCHD	10XCHD	10XCHD	10XCHD	15XCHD	10XCHD
Опір сталі	20,5	35,0	35,0	35,0	35,0	29,5	35,0
I_{op} , см ⁴	612 247	612 247	684 823	684 823	1 658 110	1 992 035	2 027 615
W_{op} , см ³	11 774,0	11 774,0	13 194,2	13 194,2	22 108,1	26 560,5	27 034,9
$W_{нет}$, см ³	10 007,9	10 007,9	11 194,2	11 194,2	11 8792	22 576,4	22 979,6
A , см ²	318,8	318,8	361,76	263,76	305,28	370,4	375,36
Розрахунок на міцність за нормальними напруженнями							
χ	1,045	1,045	1,047	1,021	1,019	1,02	1,019
m	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
σ , МПа	33,38	33,38	29,79	30,58	30,3	25,42	30,75
$0,9 R_y$, МПа	18,45	31,50	31,5	31,50	31,50	26,55	31,5
Умова	не виконана			виконана			
Розрахунок на витривалість за нормальними напруженнями							
$\sigma_{max,ef}^e$, МПа	Дані розрахунки не виконувались (не виконується умова міцності за нормальними напруженнями при застосуванні сталей 15XCHD та 10XCHD і збільшенні моменту інерції до максимально можливого)		14,90	14,90	15,02	12,65	15,43
γ_w			0,577	0,577	0,655	0,751	0,712
χ_3			1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
$\gamma_w 0,9 R_y$, МПа			18,18	18,18	20,63	19,94	22,37
Умова				виконана			
Розрахунок за максимальними дотичними напруженнями							
Q_{max}^m	Дані розрахунки не виконувались (не виконується умова міцності за нормальними напруженнями при застосуванні сталей 15XCHD та 10XCHD і збільшенні моменту інерції до максимально можливого)		1 350,3	1 350,3	1 650,2	1 663,0	1 803,8
S_{op}^{mn} , см ³			7 361,6	6 156,2	10 054,5	12 574,6	12 775,2
S_{op}^m , см ³			5 667,2	5 667,2	8 971,9	11 680,0	11 858,4
χ_2			1,058	1,019	1,027	1,018	1,018
I_{op} , см ⁴			684 823	684 823	1 658 110	1 992 035	2 027 615
t_w , мм			14	14	14	12	12

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Закінчення табл. 1

End of table 1

Тип балки	Суцільна стінка		Перфорована				
t_f , мм		28	28	34	40	36	
$R_s m / \gamma_m$, МПа		18,27	18,27	18,27	15,39	18,27	
τ , МПа		9,79	8,51	6,96	8,59	9,3	
Умова				виконана			
σ_x , МПа	Дані розрахунки не виконувались (не виконується умова міцності за нормальними напруженнями при застосуванні сталей 15ХСНД та 10ХСНД і збільшенні моменту інерції до максимально можливого)	24,92	24,92	24,67	20,70	25,00	
σ_y , МПа		2,44	2,44	2,44	2,85	2,85	
τ_{xy} , МПа		3,75	3,75	3,0	3,83	4,15	
p , МПа		3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	
M_x^M , кНм		2 659,3	2 659,3	4 336,6	4 674,4	5 744,8	
Q_x^M , кН		605,7	605,7	776,6	783,0	850,9	
$\gamma^1 R_y m$, МПа		34,65	34,65	34,65	29,21	34,65	
σ_{xy} , МПа		24,66	24,66	24,11	20,53	24,76	
Умова					виконана		

Таблица 4

Обчислені величини перехідного коефіцієнту

Table 4

Calculated values of the transition coefficient

Довжина завантаження, м	Інтенсивність еквівалентного навантаження, тс/м		Перехідний коефіцієнт δ_n
	K = 1 (СК, a = 0,5)	K = 1 (НК, a = 0,5)	
5	1,817	2,410	1,759
6	1,740	2,260	1,796
7	1,681	2,260	1,736
8	1,634	2,280	1,672
9	1,594	2,230	1,668
10	1,558	2,160	1,683
12	1,497	1,980	1,764
14	1,444	1,880	1,792
16	1,398	1,820	1,792
18	1,356	1,790	1,768
20	1,317	1,740	1,766
25	1,236	1,590	1,814

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Еквівалентні навантаження С14 обчислюються у тс/м колії при значеннях параметрів $1,5 \leq \lambda \leq 50$ м ($\alpha = 0$ і $\alpha = 0,5$) та $\lambda > 50$ м ($\alpha = 0$) і отримано за формулою

$$v = \left(9,807 + \frac{10,787}{e^{0,04\lambda}} + \frac{43,149}{\lambda^2} \right) \left(1 - \frac{\alpha}{4} \right) K. \quad (11)$$

Перехідний коефіцієнт обчислюємо за формулою

$$\delta_n = \frac{H1_{ск} 14}{H1_{нк} 6}, \quad (12)$$

де $e = 2,718$ – основа натуральних логарифмів, λ – довжина завантаження, м (виходячи з довжин прогонів, що розраховувались, обмежуємося інтервалом $\lambda = 5 - 25$ м); $H1_{ск}$, $H1_{нк}$ – інтенсивність еквівалентного навантаження тс/м за дод. Л [5] та табл. 4 [11]. Результати наведені у табл. 4.

Визначена величина коефіцієнта δ_n як середнього арифметичного наведених значень становить 1,75, де сучасні навантаження на 75 % більші, ніж ті, на які запроєктовані прогонові будови наплавного мосту з майна НЗМ-56.

Результати

1. Сучасні навантаження для розрахунку мостів на 75 % більші, ніж ті, на які запроєктовані прогонові будови наплавного мосту з майна НЗМ-56.

2. Таким чином навіть застосовуючи для прогонових будов з даним перерізом більш міцну сталь (10ХСНД), можна вийти на навантаження типу НК не більше, ніж Н9 (проти Н6).

3. Тільки при застосуванні сталі 10ХСНД у сукупності із збільшенням площі перерізу при максимальних рекомендованих товщинах прокату вертикальних (14 мм) та горизонтальних (28 мм) листів дає змогу запроєктувати прогонові будови з суцільних двотаврів висотою 104 см і тільки для прогонових будов довжиною 12,35 м.

4. Застосування наскрізних двотаврів утворених з двотавра № 70 (висота наскрізного 104 см) зменшує площу перерізу у послабленому місці, але практично не впливає на коефіцієнт χ при розрахунках на міцність та витривалість за нормальними напруженнями. У разі застосування сталі 10ХСНД при розрахунковій довжині прогонової будови 11,70 м перфорована

на балка проходить перевірки по всіх напруженнях, хоча і практично не має запасу.

5. Для прогонових будов більшої довжини (16,47 та 18,53 м) зазначені у п. 3 рекомендації не дають позитивного результату (навіть при товщині горизонтального листа 40 мм). Тому подальші розрахунки виконані для прогонових будов з наскрізних двотаврів висотою 150 см, які утворені з означених вище двотаврів з суцільною стінкою висотою 104 см.

6. З точки зору оптимальної довжини прогонових будов можна рекомендувати прогони більшої довжини. Виготовлені з перфорованих двотаврів висотою 150 см зі сталі 10ХСНД в них оптимально використовуються всі геометричні параметри. Збільшення довжини приводить до зменшення кількості опор (понтонів). Якщо врахувати рекомендації щодо застосування понтонів, наведені у роботах авторів, то будемо мати оптимальну конструкцію наплавного мосту в цілому.

7. Застосування наскрізних двотаврів для прогонових будов наплавних мостів дає економію металу до 22 %, тобто кожна п'ята прогонова будова буде виготовлена зі зекономленого металу. Економія на кожній прогоновій будові, наприклад СРП-33.6 – 263 тис. грн. (з врахуванням ціни на 1 тону готового виробу – 29 тис. грн.)

Наукова новизна та практична значимість

Дослідження дозволяє зробити новий крок щодо економії матеріалу та використанні наскрізних двотаврових балок для прогонових будов в цілому.

Висновок

В результаті дослідження отримані дані дозволяють більш детально ознайомитися та більш практично використовувати наскрізні двотаври для прогонових будов наплавних мостів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беленя, Е. И. Металлические конструкции. Общий курс : учеб. для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведерников. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 560 с.
2. Бильченко, А. В. Особенности системы мониторинга физического состояния городских

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- мостов / А. В. Бильченко, А. Г. Кислов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39. – С. 23–26.
3. Бирюлев, В. В. Проектирование металлических конструкций : спец. курс / В. В. Бирюлев. – Л. : Транспорт, 1990. – 433 с.
 4. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. – К. : Мінбуд України, 2006. – 217 с.
 5. ДБН В.1.2-15:2009. Навантаження та впливи. Мости та труби. – К. : Мінбуд України, 2009. – 83 с.
 6. ДБН В.2.3-26:2010. Споруди транспорту. Мости та труби. Сталеві конструкції. Правила проектування. – К. : Мінбуд України, 2010. – 195 с.
 7. Кручинкин, А. В. Сборно-разборные временные мосты / А. В. Кручинкин. – М. : Транспорт, 1987. – 191 с.
 8. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*. Стальные конструкции). – М., 1989. – 495 с.
 9. Распопов, А. С. Особенности построения объемных конечных элементов для расчёта континуальных моделей мостовых конструкций / А. С. Распопов, В. Е. Артемов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39. – С. 163–167.
 10. СНиП II-23-81. Нормы проектирования. Стальные конструкции. – М., 1990. – 134 с.
 11. Справочник офицера-мостовика железнодорожных войск. – М. : Воен. изд-во МО СССР, 1963. – 951 с.
 12. Тришевский, И. С. Металлические облегченные конструкции : справоч. пособие / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда. – К. : Будівельник, 1978. – 110 с.
 13. ТУ 14-2-24-72 Сталь горячекатаная. Двутавры и тавры с параллельными гранями полок. Сортаменты. Технические условия. – М., 1972. – 24 с.
 14. Barbaccia, T. G. Bridging the Gap Between Economics and Innovation / T. G. Barbaccia // Better ROADS. – 2014. – № 1. – P. 21.
 15. Croarkin, M. Talking it through / M. Croarkin, Z. Kamaitis // ROADS & BRIDGES. – 2014. – № 1. – P. 20.
 16. Zagoudis, J. Fit for man and beast / J. Zagoudis // ROADS & BRIDGES. – 2013. – № 1. – P. 30–32.

Ю. Н. ГОРБАТЮК^{1*}, К. И. СОЛДАТОВ^{2*}, М. С. ПАПКО^{3*}

^{1*}Каф. «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (093) 339 41 28, эл. почта KVP@DSST.gov.ua

^{2*}Каф. «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (096) 527 26 01, эл. почта KVP@DSST.gov.ua

^{3*}Днепропетровский завод мостовых железобетонных конструкций, ул. Молодогвардейская, 2, Днепропетровск, Украина, 49022, тел. +38 (096) 826 74 19, эл. почта player_m@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СКВОЗНЫХ ДВУТАВРОВ ДЛЯ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ НАПЛАВНЫХ МОСТОВ

Цель. В публикации приведены результаты расчетов пролетных строений для наплавных мостов из сквозных двутавров. Цель исследования – проанализировать пригодность пролетных строений из сквозных двутавров для наплавных мостов минимального веса под погрузку, предусмотренных нормами для проектирования современных наплавных мостов. **Методика.** В работе использованы сравнительный метод, аналитические методы расчета мостов (методика линий влияния), расчеты на прочность, выносливость, максимальные касательные напряжения. **Результаты.** Современные нагрузки для расчета мостов на 75 % больше, чем те, на которые запроектированы пролетные строения наплавного моста из имущества НЗМ-56. Применение сквозных двутавров, образованных из двутавра № 70 (высота сквозного 104 см), уменьшает площадь сечения в ослабленном месте, но практически не влияет на прочность и выносливость материала. Применение сквозных двутавров для пролетных строений наплавных мостов дает экономию металла до 22 %, то есть каждое пятое пролетное строение будет изготовлено из экономлененного металла. Экономия на каждом пролетном строении, например СРП-33.6 – 263 тыс. грн. (с учетом цены на 1 тонну готового изделия 29 тыс. грн.). **Научная новизна.** Исследование позволяет сделать новый шаг в экономии материала и использовании сквозных двутавровых балок пролетных строений в целом. **Практическая значимость.** Полученные в результате исследования данные позволили сделать ряд выводов, способствующих более детальному ознакомлению и более практичному использованию сквозных двутавров для пролетных строений наплавных мостов.

Ключевые слова: железнодорожные мосты; наплавные мосты; сквозные двутавры; пролетные строения; экономия металла; прогресс мостостроения

YU. M. GORBATIUK^{1*}, K. I. SOLDATOV^{2*}, M. S. PAPKO^{3*}^{1*}Dep. «Bridges», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 339 41 28, e-mail KVP@DSST.gov.ua^{2*}Dep. «Bridges», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 527 26 01, e-mail KVP@DSST.gov.ua^{3*}Dnipropetrovsk Plant of Bridge Reinforced Concrete Structures, Molodohvardiiska St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49022, tel. +38 (050) 457 68 19, e-mail player_m@list.ru

RESEARCH OF USING OPEN DOUBLE T BEAMS FOR SPANS IN FLOATING BRIDGES

Purpose. The publication presents the results of calculations of spans for floating bridges with open double T beams. The purpose of research is to analyze the suitability of spans from open double T beams for floating bridges with minimum weight under loads, which is provided by standards for modern floating bridges designing.

Methodology. Comparative method, analytical calculation methods (influence lines methodology), strength calculations, endurance, maximum shear stress are used in this paper. **Findings.** Current loads for bridges calculations are 75% more than those, for which the spans of floating bridge from NZhM-56 property are designed. The use of open double T beams that is formed with double T beam no. 70 (the height of the open one is 104 cm) reduces the cross sectional area in a weakened spot, but virtually it does not influence the strength and durability of the material. The use of open double T beams for spans of floating bridges saves up to 22% of metal that means one in five spans will be made of saved metal. Savings on each spans, such as CRP, will be 33.6 - 263 thous. grn. (considering the price of 1 ton of final product 29 thous. grn.). **Originality.** Research allows making next step in material saving and use of open double T beams for spans in the whole. **Practical value.** The obtained results give us possibility to make a number of conclusions that allow us to become more familiar and more practical with the use of open double T beams for spans of floating bridges.

Keywords: railway bridges; floating bridges; open double T beams; spans; metal saving; bridge engineering progress

REFERENCES

1. Belenya Ye.I., Baldin V.A., Vedernikov G.S. *Metallicheskiye konstruksii. Obshchiy kurs* [Metal structures. General course]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 560 p.
2. Bilchenko A.V., Kislov A.G. Osobennosti sistemy monitoringa fizicheskogo sostoyaniya gorodskikh mostov [Features of the monitor system of urban bridges physical state]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 39, pp. 23-26.
3. Biryulev V.V. *Proyektirovaniye metallicheskiy konstruksiy* [Metal structures design]. Leningrad, Transport Publ., 1990. 433 p.
4. *DBN V.2.3-14:2006 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia* [SBN V.2.3-14: 2006 Transport facilities. Bridges and pipes. Design rules.]. Kyiv, Minbud Ukrainy Publ., 2006. 217 p.
5. *DBN V.1.2-15-2009. Navantazhennia ta vplyvy. Mosty ta truby* [SBN V.1.2-15-2009. Loads and influences. Bridges and pipes]. Kyiv, Minbud Ukrainy Publ., 2009. 83 p.
6. *DBN V.2.3-26-2010. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Stalevi konstruksii. Pravyla proektuvannia* [SBN V.2.3-26-2010. Transport facilities. Bridges and pipes. Steel construction. Design rule]. Kyiv, Minbud Ukrainy Publ., 2010. 195 p.
7. Kruchinkin A.V. *Sborno–razbornyye vremennyye mosty* [Collapsible temporary bridges]. Moscow, Transport Publ., 1987. 191 p.
8. *Posobiye po proyektirovaniyu stalnykh konstruksiy* [Manual for the design of steel structures]. Moscow, 1989. 495 p.
9. Raspopov A.S., Artemov V.Ye. Osobennosti postroyeniya obyemnykh konechnykh elementov dlya rascheta kontinualnykh modeley mostovykh konstruksiy [Features of volumetric finite elements construction for the calculation of continuum models of bridge structures]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 39, pp. 163-167.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

10. *SNiP II-23-81. Normy proyektirovaniya. Stalnyye konstruksii* [SNAR II-23-81. Design standards. Steel structures]. Moscow, 1990. 134 p.
11. *Spravochnik ofitsera-mostovika zheleznodorozhnykh voysk* [Bridge officer guide of railway troops]. Moscow, Voen. izd-vo MO SSSR Publ., 1963. 951 p.
12. Trishevskiy I.S., Klepanda V.V. *Metallicheskiye oblegchennyye konstruksii* [Metal lightweight structures]. Kyiv, Budivelnik Publ., 1978. 110 p.
13. *TU 14-2-24-72 Stal goryachekatanaya. Dvutavry i tavry s parallelnymi granyami polok. Sortamenty. Tekhnicheskiye usloviya* [TC 14-2-24-72 Hot-rolled steel. Beams and tees with parallel flange edges. Assortments. Technique specifications]. Moscow, 1972. 24 p.
14. Zagoudis J. Fit for man and beast. *ROADS & BRIDGES*, 2013, no. 1, pp. 30-32.
15. Croarkin M., Kamaitis Z. Talking it through. *ROADS & BRIDGES*, 2014, no. 1, p. 20.
16. Barbaccia T.G. Bridging the Gap Between Economics and Innovation. *Better ROADS*, 2014, no. 1, p. 21.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. В. Радкевичем (Україна); д.т.н., проф. Є. А. Єгоровим (Україна)

Надійшла до редколегії 10.02.2014

Прийнята до друку 18.03.2014