

УДК 625.745.1

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ, ЩО ДІЮТЬ НА СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННІ МОСТИ

Проведено вимірювання розподілу температури на поверхнях сталезалізобетонних мостів. Наведено методику оцінки теплових потоків, які діють на сталезалізобетонні балки моста при дії змінних перепадів температури навколишнього середовища. Виконано оцінку теплових потоків, що діють на горизонтальну та вертикальну поверхні сталезалізобетонної балки моста. Встановлено, що на розподіл теплових потоків сталезалізобетонною балкою моста впливає температура поверхні та швидкість вітру.

The temperature distribution on the surfaces of reinforced concrete bridges was measured. The method of estimation of heat fluxes acting on reinforced concrete beams of the bridge under the action of variable differences in ambient temperature is given. The estimation of heat fluxes acting on the horizontal and vertical surfaces of the reinforced concrete beam of the bridge is performed. It is established that the surface temperature and wind speed influence the distribution of heat fluxes by a reinforced concrete beam.

Ключові слова: сталезалізобетонні мости, теплові потоки, температура поверхні, температура навколишнього середовища.



А.М. Онищенко
завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету, д.т.н., професор



О.В. Федоренко
виконувач обов'язків генерального директора – заступник генерального директора з розвитку виробництва комунальної корпорації «Київавтодор»



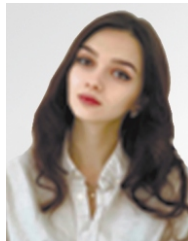
В.В. Ковальчук
професор кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету, д.т.н., доцент



Р.Т. Рибак
магістр кафедри будівельного виробництва Інституту будівництва та інженерії доквілля Національного університету «Львівська політехніка»



Б.З. Парнета
доцент кафедри будівельного виробництва Інституту будівництва та інженерії доквілля Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доцент



М.Б. Парнета
магістр кафедри будівельного виробництва Інституту будівництва та інженерії доквілля Національного університету «Львівська політехніка»

Серед значної кількості існуючих сталезалізобетонних транспортних споруд значне місце посідають мости, які зводяться переважно для перекриття великих прогонів.

Особливістю сталезалізобетонних мостів є з'єднання металевої балки із залізобетонною плитою з допомогою напівжорстких або жорстких металевих упорів. У результаті утворюється сталезалізобетонна балка із різних конструкційних матеріалів (сталь і залізобетон) із відмінними фізико-механічними параметрами.

У ряді випадків виникає проблема щодо безпечної експлуатації сталезалізобетонних мостів з урахуванням впливу транспортних дій та температурних впливів навколишнього середовища, які викликають розвиток дефектів та пош-

коджень сталезалізобетонних балок різного виду, що призводять до зниження їх несної здатності.

Постановка проблеми. Сталезалізобетонні мости у процесі експлуатації зазнають різних температурних впливів і навантажень [1–3]. Основними із них є пряме та відбите сонячне випромінювання, температура навколишнього середовища, теплове випромінювання середовища та атмосфери, а також розсіяне сонячне випромінювання.

Одним із факторів, що може призвести до руйнування конструкційних матеріалів балок моста, є теплові потоки, що діють на прогонові будови моста при змінних температурах навколишнього середовища. Слід зазначити, що спостерігаються дефекти у вигляді тріщини залізо-



Рис. 1. Характерні пошкодження сталезалізобетонних мостів у процесі експлуатації

бетонних плит та порушення з'єднання металевої балки із залізобетонною плитою (рис. 1).

У роботі [4] зазначено, що процес появи тріщин є небезпечним, оскільки він призводить до розвитку корозії робочої арматури залізобетонної плити. Також тріщини пришвидшують процес карбонізації прилеглих шарів бетону. При інтенсивному розвитку тріщин зменшується висота стиснутої зони бетону та знижується міцність перерізу. Це сприяє розвитку значних деформацій балки, внаслідок зменшення жорсткості попередних перерізів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для дослідження впливу температури навколишнього середовища на напружено-деформований стан сталезалізобетонних балок, на першому етапі необхідно визначити розподіл температурного поля поверхнями балок. Далі за відомими значеннями температурного поля розв'язати задачу термопружності і визначити напружено-деформований стан сталезалізобетонних балок моста. Кожен із зазначених етапів вимагає достовірного задання значень теплових потоків у характерних ділянках сталезалізобетонних балок моста.

У роботі [1] зазначено, що при вирішенні температурної задачі крайові умови можна задавати у вигляді значень температури на поверхнях сталезалізобетонних балок мостів або у вигляді значень теплових потоків.

У роботах [1, 5, 6] зазначено, що визначення величин теплових потоків, які підходять до моста, є необхідною умовою оцінювання рівня температурних напружень та деформацій сталезалізобетонних мостів. Тому для встановлення дійсного термонапруженого стану сталезалізобетонних мостів необхідно розробити методику достовір-

ного визначення теплових потоків, які діють на мости.

Методика оцінки теплових потоків, що діють на сталезалізобетонні мости. Щільність теплового потоку [1] при конвекції залежить від температури поверхні сталезалізобетонної балки моста T_s , температури повітря навколишнього середовища T та коефіцієнта тепловіддачі конструкційних матеріалів мостів T_c і визначається за формулою

$$q = h_c(T_s - T). \quad (1)$$

Температура поверхні прогнаної будови сталезалізобетонної балки моста та температура повітря повинні вимірюватись у процесі експериментальних досліджень розподілу температури поверхнями сталезалізобетонних балок моста.

Рекомендовані значення коефіцієнта тепловіддачі для різних конструкційних матеріалів наведено у роботах [7, 8, 9]. Також слід зазначити, що щільність теплового потоку залежить як від температури поверхні балки, так і від швидкості вітру, яка була зафіксована у процесі експериментальних досліджень.

У разі дії сонячного випромінювання щільність теплового потоку для поверхні балок моста, які розташовані нормально до променів, визначається за відомим рівнянням, яке враховує час доби τ , інтенсивність сонячного випромінювання за межами атмосфери, що становить $I_0 = 1350 \text{ Вт/м}^2$, та коефіцієнт послаблення випромінювання атмосферою, який залежить від часу доби $k_T(\tau)$ і визначається за формулою

$$I(\tau) = I_0 k_T(\tau). \quad (2)$$

Коефіцієнт послаблення випромінювання атмосферою залежить від широти місцевості та її вологості і згідно з [1, 9] визначається за формулою

$$k_T(\tau) = 0,9^{m(\tau) t_u}, \quad (3)$$

де m – коефіцієнт повітряної маси, який залежить від висоти Сонця; t_u – коефіцієнт мутності атмосфери.

У роботах [6, 9] зазначено, що для сонячної погоди коефіцієнт мутності атмосфери знаходиться у межах від 1,8 до 3,0. У промислових районах він досягає значень 9,0. У переважній більшості приймається усереднене значення коефіцієнта мутності атмосфери, що становить 2,4.

Випромінювання від дії сонячних променів залежить від розташування поверхні моста по відношенню до дії променів. При горизонтальному розташуванні поверхні випромінювання, яке падає на неї, обчислюється за формулою

$$I(\theta) = I_0 \sin h \cos(a_s - a_v) \quad (4)$$

а при вертикальному розташуванні поверхні – за формулою

$$I(\theta) = I_0 \sin h \frac{\cos h}{\sin h} \cos(a_s - a_v) \quad (5)$$

де $h(\theta)$ – висота Сонця, рад; a_v та a_s – азимут поверхні та Сонця відповідно, рад. Складові яких визначаються за методикою, що наведена у роботі [9].

Поряд із прямим сонячним випромінюванням на поверхні сталезалізобетонних балок моста діє і розсіяне сонячне випромінювання, інтенсивність якого на горизонтальну поверхню обчислюється за формулою

$$H(\theta) = 0,5I_0 \sin h (e^{-m} + e^{-m_u}), \quad (6)$$

де e^{-m_u} – знаходиться у межах від 0,81 до 0,91 і фізично відображає процес ослаблення випромінювання атмосферою. У більшості розрахунків приймається усереднене його значення; e^{-m} – коефіцієнт, що залежить від висоти Сонця.

Конструкції сталезалізобетонного моста зазнають також дії відбитого випромінювання місцевостей, щільність теплового потоку якого визначається за формулою

$$R(\theta) = r[I(\theta) + H(\theta)], \quad (7)$$

де r – коефіцієнт альбедо.

Отже, у процесі експлуатації відбувається теплообмін поверхні сталезалізобетонних мостів та атмосфери, який описується законом Стефана-Больцмана

$$S_A(\theta) = \epsilon_A C(T_V^4 - T_L^4), \quad (8)$$

де T_L – температура повітря атмосфери, К; T_V – температура поверхні, К; ϵ_A – коефіцієнт випромінювання ($\epsilon_A = 0,95$ [1]).

Слід зазначити, що з енергії, яка потрапляє на поверхню сталезалізобетонної балки моста, у тепло перетворюється та частина, яка поглинається поверхнею сталезалізобетонного моста, що залежить від виду конструкційного матеріалу балки моста. Енергію, що потрапляє на сталезалізобетонні балки моста, можна визначити за законом Кірхгофа [6]

$$q(\theta) = pS_{U,A}(\theta), \quad (9)$$

де $S_{U,A}$ – теплове випромінювання атмосфери або земних поверхонь; p – коефіцієнт поглинання теплового випромінювання сталезалізобетонною балкою моста. Для бетонної поверхні плити коефіцієнт поглинання становить $p = 0,7$, а для металевої балки $p = 0,95$.

Далі проведемо оцінювання теплових потоків, що зазнає сталезалізобетонна балка моста у процесі експлуатації за сонячної погоди.

Розрахунок теплових потоків, що діють на сталезалізобетонну балку моста. Об'єктом для визначення розподілу температури поверхнями балок був сталезалізобетонний міст, розташований у м. Бурштин, Івано-Франківської області. Фасад моста наведено на рис. 2.

Прогонова будова моста загальною проектною довжиною 240,611 м (між крайніми торцями прогонових будов) складається із десяти прогонів, запроєктованих за статичною схемою 2 18,0 + 4 33,0 + 4 18,0 м. Шість прогонів завдовжки 18 м (0–1, 1–2, 6–7 ... 9–10) – балкові розрізні, виконані залізобетонними збірно-монолітними, у їхньому поперечному перерізі розташовано по десять залізобетонних П-подібних балок завдовжки 18 м та заввишки 0,850 м, об'єднаних монолітною залізобетонною плитою проїзної частини завтовшки 0,14 м. Залізобетонна плита проїзної частини у прогонах 0–1, 1–2 та у прогонах 6–7...9–10 виконана температурно-нерозрізною. Чотири прогони завдовжки 33 м (2–3...5–6) – балкові розрізні, виконані сталезалізобетонними. У поперечному перерізі моста розташовано по чотири сталеві двотаврові балки завдовжки 33 м, повною висотою 1,832 м та висотою ребра 1,8 м, об'єднаних монолітною залізобетонною плитою проїзної частини з товщиною 0,2 м (у прогоні плити), а також поперечними та вітровими сталевими в'язями. Об'єднання моно-



Рис. 2. Фасад сталезалізобетонного моста на км 9+442 автомобільної дороги Т-09-10 Бурштин-Калуш

Таблиця 1

Експериментальні вимірювання розподілу температури на поверхні сталезалізобетонної балки у м. Бурштин, Івано-Франківська область

Схема точок для вимірювання температури	Час доби, год	Температура повітря, °С	Ділянки вимірювання температури на поверхнях сталезалізобетонної балки				
		T_i	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
	8:00	9,0	9,2	9,2	9,6	9,5	10,5
	9:00	11,0	11,4	11,2	12,7	12,4	11,7
	10:00	14,0	15,4	15,4	15,7	14,2	14,0
	11:00	18,0	21,4	20,7	21,1	20,5	17,2
	12:00	20,0	24,4	25,4	26,8	25,1	23,4
	13:00	24,0	27,3	27,7	28,9	26,1	25,4
	14:00	25,0	30,1	30,7	31,4	29,4	26,4
	15:00	27,0	32,3	32,4	33,8	34,8	27,0
	16:00	28,0	35,7	35,0	35,1	36,1	27,1
	17:00	25,0	32,1	32	32,1	31,1	25,1
	18:00	23,0	30,0	29,9	30,5	25,7	24,8

літної плити із сталевими головними балками виконане за допомогою напівжорстких упорів типу Nelson (SD 16x200 S 235 J2). Матеріал в'язей, головних та домкратних балок – сталь марки 10ХСНД.

Для вимірювання температури на поверхнях сталезалізобетонної балки її було розбито на характерні ділянки. Нижня полицка сталезалізобетонної балки має ділянку T_1 , перехідна зона від нижньої полицки до стінки балки є ділянкою T_2 , вертикальна стінка балки є ділянкою T_3 , перехід стінки балки у верхню полицку – ділянкою T_4 та нижня частина залізобетонної плити є ділянкою T_5 .

Вважається, що у межах однієї ділянки температура має сталі значення. У результаті вимірювання температури записано її максимальне значення із виміряних значень у межах ділянки. Результати розподілу температури в характерних ділянках сталезалізобетонної балки моста у вертикальному напрямі наведено у таблиці 1. Вимірювання температури було проведено 25.09.2020 р.

За результатом проведеного вимірювання температури на характерних ділянках сталезалізобетонної балки максимальне значення температури зафіксовано на стінці балки у межах ділянки T_3 . Що пояснюється дією прямих сонячних променів. Також слід зазначити, що вищу температуру має металева балка у порівнянні із температурою залізобетонної плити.

Оцінку рівня теплових потоків будемо визначати лише за максимальних значень температур, виміряних на зовнішній поверхні сталезалізобетонної балки моста, що наведені у таблиці 1. Такою є ділянка T_3 .

За наведеною методикою визначення теплових потоків отримано значення теплових потоків, які поглинаються сталезалізобетонною балкою. При цьому враховуються вертикальні та горизонтальні поверхні балки. Результати визначення теплових потоків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Теплові потоки, що діють на сталезалізобетонну балку моста у вертикальному напрямі

Час доби, год.	Випромінювання, що поглинається вертикальною поверхнею балки, Вт/м ²	Випромінювання, що поглинається горизонтальною поверхнею балки, Вт/м ²
8:00	84,63	156,21
9:00	223,17	289,75
10:00	360,08	402,13
11:00	535,64	483,13
12:00	634,28	524,70
13:00	660,44	491,28
14:00	710,66	422,42
15:00	632,42	312,50
16:00	481,60	184,46
17:00	275,48	67,55
18:00	137,57	32,33

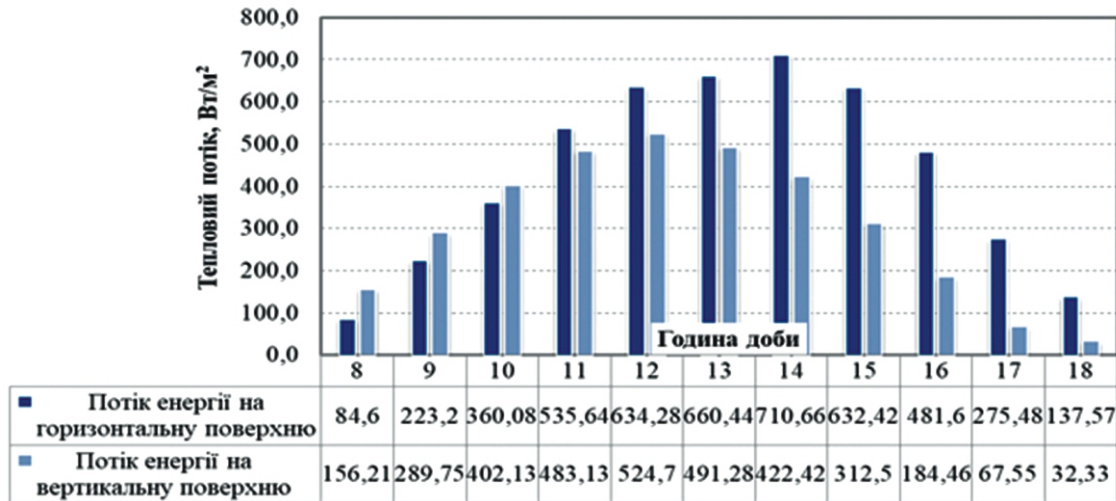


Рис. 3. Порівняння впливу складових сонячного випромінювання на горизонтальну та вертикальну поверхні сталезалізобетонної балки моста

Як бачимо, всі значення теплових потоків мають позитивний знак. Це означає, що сталезалізобетонна балка поглинає тепло від джерел.

Графічна залежність теплових потоків, що діють на горизонтальну та вертикальну поверхні балки моста, наведено на рис. 3.

Максимальна величина теплових потоків, які отримує балка, склала 710 Вт/м^2 . При цьому максимум теплових потоків, що поглинаються сталезалізобетонною балкою моста, спостерігається від 14:00 до 16:00 години. Ці години доби є орієнтиром для визначення максимальних теплових потоків, що діють на мости.

Висновки. 1. Результати експериментальних вимірювань розподілу температури по характерних ділянках сталезалізобетонної балки моста

показали, що існує різниця температур у суміжних ділянках балки. Тому для задання середніх значень температури при проектуванні сталезалізобетонних мостів (як це вимагається нормами [10]) необхідно вести багаторічні спостереження за розподілом температури із врахуванням комплексу різних природних чинників.

2. Встановлено, що максимальні теплові впливи на сталезалізобетонні мости за ясної погоди діють у період із 14:00 до 16:00 години.

3. Визначення теплових потоків, що діють на балки мостів, дасть змогу достовірно виявити термонапружений стан сталезалізобетонних мостів при дії змінних кліматичних температурних впливів навколишнього середовища.

[1] Лучко Й.Й. Алгоритм визначення граничних умов для дослідження температурних напружень та деформацій балкових конструкцій залізничних мостів від кліматичних впливів / Й.Й. Лучко, В.В. Ковальчук // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2012. – Вип. 46. – С. 233–243. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba_2012_46_35.

[2] Prakash Rao. D.S. Temperature Distribution and Stresses in Concrete Bridges / D.S. Prakash Rao // American Concrete Institute, ACI Journal. – 1986. – Vol.83 – №4. – P. 588–596.

[3] Shiu K. Ham. Seasonal and Divalen Behanol of Concrete Box Girder Brides / Shiu K. Ham // Transportation Research record. – 1984. – № 982. – P. 50–56.

[4] Ковальчук В.В. Стан та проблеми забезпечення довговічності прогнонових будов мостів / Збірник наукових праць ДонІЗТ. – Донецьк, 2012. – № 32. – С. 226–235.

[5] Dwivedi A.K. Temperature effects in the design of concrete bridges / A.K. Dwivedi, Pradeep Bhargava, N. M. Bhandari // Advances in Bridge Engineering. – March 24-25. – 2006.

[6] Mangerig I. Klimatische Temperaturbeanspruchung von Stahl- und Verbundbrucken / Technisch-Wissenschaftliche Mitteilung Nr. 86-4 des Instituts fur Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr Universitat Bochum, 1984. – 136 s.

[7] Dilger W.H. Temperature stresses in composite box girder bridges W.H. Dilger, A. Ghali, M.S. Cheung, M.A. Maes // Journal of Structural Engineering. – 1983. – № 109 (6). – P. 1460–1478.

[8] Serrano P. Simulation del comportarniento termico de tableros de Puente / P. Serrano, J. Cruces // Hormigon y acero. – 1986. – № 161. – P. 21–34.

[9] Лучко Й.Й. Вимірювання напружено-деформованого стану конструкцій мостів при змінних температурах і навантаженнях: Монографія / Й.Й. Лучко, В.В. Ковальчук. – Львів: Каменяр, 2012. – 235 с.

[10] ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи: – К.: Мінбуд України, 2009. – 83 с.

Надійшла 05.04.2021 р.