

УДК 625.745.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.238440

Методика визначення термопружного стану залізобетонної балки моста підсиленої метилметакрилатом

В. В. Ковальчук, Ю. Г. Соболевська, А. М. Онищенко, О. В. Федоренко, О. П. Токін, А. П. Павлів, І. Б. Кравець, Ю. З. Лесів

Проведено аналіз методів визначення температурних напружень та деформацій у мостових конструкціях при дії кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища.

Застосовано одновимірну модель визначення температурного поля та термопружного стану для практичної оцінки температурних полів та напружень підсиленних балок із врахуванням температурних перепадів навколишнього середовища.

Отримано розподіл температурного поля у вертикальному напрямі залізобетонної балки у залежності від товщини конструктивного підсилення метилметакрилатом. Встановлено, що на контакті залізобетонної балки та підсилення спостерігається зміна градієнту температури.

Отримано розподіл температурних напружень у вертикальному напрямі підсиленої залізобетонної балки із врахуванням товщини підсилення метилметакрилатом та величини модуля його пружності. Встановлено, що товщина підсилення не має значного впливу на підвищення напружень, проте збільшення модулю пружності конструктивного підсилення призводить до підвищення температурних напружень. Різниця отриманих значень напружень для балки із метилметакрилатним підсиленням товщиною 10 мм і 20 мм при модулі пружності $E=15000$ МПа становить до 3 % при додатних і від'ємних температурах.

Встановлено, що на контактній поверхні залізобетонної балки і метилметакрилатного підсилення відбувається зміна характеру розподілу температурних напружень по висоті балки. Значення температурних напружень у балці із метилметакрилатним підсиленням і дії додатних та від'ємних температур навколишнього середовища збільшується у три рази.

Встановлено, що на величину температурних напружень впливає різниця температур залізобетонної балки і підсилення, а також фізико-механічні параметри досліджуваних конструкційних матеріалів балки та конструктивного підсилення метилметакрилатом.

Ключові слова: підсилення моста, залізобетонна балка, метилметакрилатне підсилення, температурне поле.

1. Вступ

Згідно джерела [1], проведеними дослідженнями технічного стану мостів України у 2020 р. встановлено, що негайного ремонту потребують 895 штучних споруд по всій Україні. З них 169 – вже у передаварійному стані.

Також слід зазначити, що ситуація із забезпечення безвідмовної роботи мостів у розвинених країнах є також актуальною проблемою. Назвімо хоча б обвал чотирикутного автодорожнього мосту в Італії у 2018 р. Тому використання перспективних технологій ремонту дефектних мостів є актуальною задачею мостової галузі.

Для підвищення несучої здатності автодорожніх мостів в останні роки використовують метод підсилення балок за допомогою метилметакрилатних композицій (далі метилметакрилату). Вигляд підсилених крайніх балок автодорожнього моста метилметакрилатом наведено на рис. 1.



Рис. 1. Підсилення залізобетонних балок моста метилметакрилатом

Метилметакрилат являє собою низьков'язкий полімер, що використовується для підсилення балок автодорожніх, міських і пішохідних мостів. Характеризується підвищеною міцністю та довговічністю [2].

Підсилення балок здійснюється за допомогою влаштування незнімної металевої опалубки у низу балки на відстані, рівній 20 мм від її нижньої полицки. Цей зазор засипається дрібним піском, а далі добавляється метилметакрилатна композиція, що вільно проникає у тріщини та капіляри.

При взаємодії метилметакрилату із частинками дрібного піску утворюється міцний конструктивний елемент, який заповнює порожнини і тріщини в залізобетонній балці, міцно їх зв'язує, що сприяє підсиленню балки.

Але при цьому слід враховувати можливий вплив кліматичних температурних умов на напружено-деформований стан залізобетонних балок мостів, підсилених метилметакрилатом.

Крім цього, значні та різкі перепади температур навколишнього середовища і збільшення діапазонів їх зміни (влітку максимальна температура зростає, взимку – мінімальна знижується) протягом останніх п'яти років приводять до підвищення деформативності балок мостів. Тому дослідження роботи конструктивного підсилення балок мостів за допомогою метилметакрилату при дії змінних температур навколишнього середовища є актуальною темою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Встановлено, що існує ряд досліджень стосовно визначення температурних полів та напружень у мостових конструкціях без підсилення при дії кліматичних температурних впливів навколишнього середовища [3–9].

У роботі [3] запропоновано математичні моделі для розрахунку теплопровідності та термонапруженого стану фрагмента металевої гофрованої оболонки транспортної споруди, бокові поверхні якої нагріті до різних температур. Однак модель оцінки термонапруженого стану оболонки враховує тільки однорідне середовище конструкції.

У роботі [4] зазначено, що різниця температур у коробчастих балках мостів може досягати значень вищих за 40 °С. Однак досліджень термопружного стану підсиленої коробчастої балки метилметакрилатними композиціями не проводилось.

У роботі [5] представлені результати довгострокового моніторингу прогинів кількох мостів у Швейцарії та показані добові та сезонні переміщення мостів під тепловим впливом. Показано співвідношення між вимірними температурами та градієнтами і положенням мосту, а також описано методи компенсації теплових ефектів. Проте досліджень впливу добових та сезонних температур на напружено-деформований стан мостів не проведено. А також не наведено моделі для оцінки термонапруженого стану мостів при дії змінних температур.

У роботі [6] приведені результати досліджень розподілу температур та відповідні реакції підвісного мосту на довжину прольоту за допомогою поєднання чисельного аналізу та моніторингу на місцях. Створено тонкі скінченно-елементні моделі складових мосту для чисельної оцінки впливу температурних полів на мостову конструкцію. Однак у роботі не наведено методів оцінки термопружного стану мостів, а тільки проведено аналіз розподілу температурних градієнтів.

У роботі [7] виконано моделювання розподілу температурного поля бетонною балкою, яке враховує тіньові ефекти та зміни інтенсивності сонячного випромінювання протягом дня. Результати показують, що температурне поле бетонної балки має явні нелінійні характеристики розподілу. Це доказує необхідність аналізу температурного поля особливо для складних конструкцій з різними перерізами вздовж поздовжньої осі.

У роботі [8] на основі експериментальних записів для композитної балки зі сталевим профілем та бетонним перекриттям була проведена і перевірена модель термічного аналізу методом кінцевих елементів. Модель вирішує питання провідності тепла в бетоні та сталі, враховуючи різні граничні умови, які включають: сонячне випромінювання, відбите випромінювання, температура повітря і швидкість навколишнього повітря.

У роботі [9] приведено результати розробки кривих температурного градієнта для прогнозування температурних напружень конструкції на основі даних польового і лабораторного моніторингу. Отримано криві градієнта температури та модель температурних напружень для композитної балки.

Однак у роботах [7–9] не проведено оцінку термопружного стану композитних балок підсилених метилметакрилатними композиціями.

У працях [10–12] наводяться дані довготривалих досліджень кліматичних температурних впливів на прогонові будови мостів. У роботі [10] проведено обчислення нестаціонарних температурних полів за допомогою розподіленого аналізу даних, що отримані довгостроковим кліматичним моніторингом. Результати досліджень [11] показують, що покриття прогонових будов відіграє важливу роль у зміні різниць температур і є суттєва різниця між температурними перепадами із покриттям чи без нього. На підставі досліджень [12] встановлено, що коливання температури спричиняють появу температурних напружень та деформацій у мостових конструкціях. Результати розрахунків температурних деформацій і напружень Мізеса, показали, що напруження від температурних градієнтів досягають значень до 25 МПа, що підкреслює обов'язковість їх врахування при дослідженні напружено-деформованого стану мостових конструкцій.

У роботі [13] зазначено, що на стадії експлуатації моста зміна температурно-вологісних умов спричиняє порушення гігromетричної рівноваги бетону з довкіллям, виникнення об'ємних деформацій і, як наслідок, зміну напружено-деформованого стану балки моста. Це насамперед спричиняє утворення мікротріщин, що обумовлює зниження характеристик тріщиностійкості залізобетонної балки.

У роботі [14] зазначено, що у балках нерозрізної конструкції напруження від теплових впливів, за даними проведених розрахунків, сягають значень в 100 МПа при стиску та 42 МПа при розтягуванні та зазначається обов'язковість врахування впливу температури навколишнього середовища на напружено-деформований стан мостів.

У роботі [15] показано, що від'ємні градієнти температури можуть спричинити появу більших за значеннями напружень, аніж додатні. Аналіз розрахунків показав, що підвищення температури навколишнього середовища у денні години доби збільшує температуру нижньої поверхні плити, при цьому напруження розтягу зменшуються. Зазначається, що різниця середніх температур верхньої та нижньої поверхонь мостової плити є важливим фактором появи напружень розтягу у нижній поверхні плит.

Як і в роботах [7–9], в дослідженнях [10–15] також не виявлено результатів щодо оцінки термопружного стану плити моста, підсиленої метилметакрилатними композиціями.

У роботі [16] при спостереженні за температурними градієнтами у прогоновій будові моста та за деформаціями у перерізі конструкції (рис. 2, 3) отримано кореляційну залежність деформацій від змін температури навколишнього середовища.

На рис. 4 наведено горизонтальні переміщення моста при підвищенні температури навколишнього середовища [17], з якого видно, що температурні впливи спричиняють вигин коробчастої балки моста.

У працях [18, 19] зазначено, що найпоширенішими в інженерній практиці є моделі для розрахунку міцності конструкцій.

Із проведеного дослідження науково-дослідних робіт видно, що моделі для визначення напружень у мостових конструкціях, що спричинені дією кліматичних температурних перепадів, є менш розповсюдженими та вивченими. Крім

цього, на сьогоднішній день не вирішено питання розробки практичних моделей із визначення температурних полів та напружень залізобетонних балках мостів підсилених метилметакрилатними композиціями. Слід зазначити, що наявність практичних моделей дасть змогу на етапі проектування ремонту відновлення несучої здатності дефектних залізобетонних балок мостів приймати конструктивні рішення із вибору матеріалів для виконання ефективного ремонту.

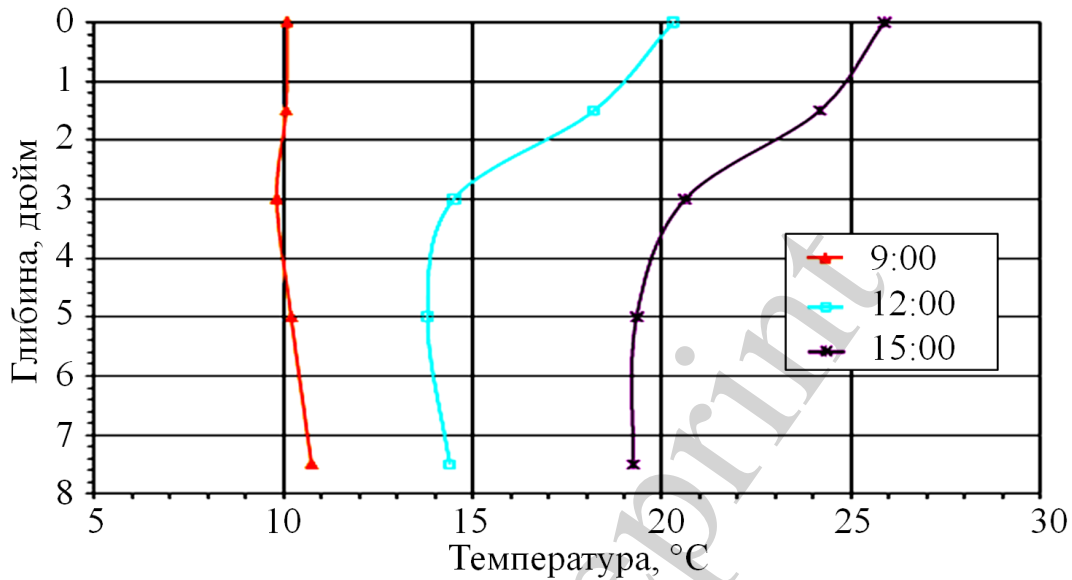


Рис. 2. Розподіл температурних градієнтів у плиті моста [16]

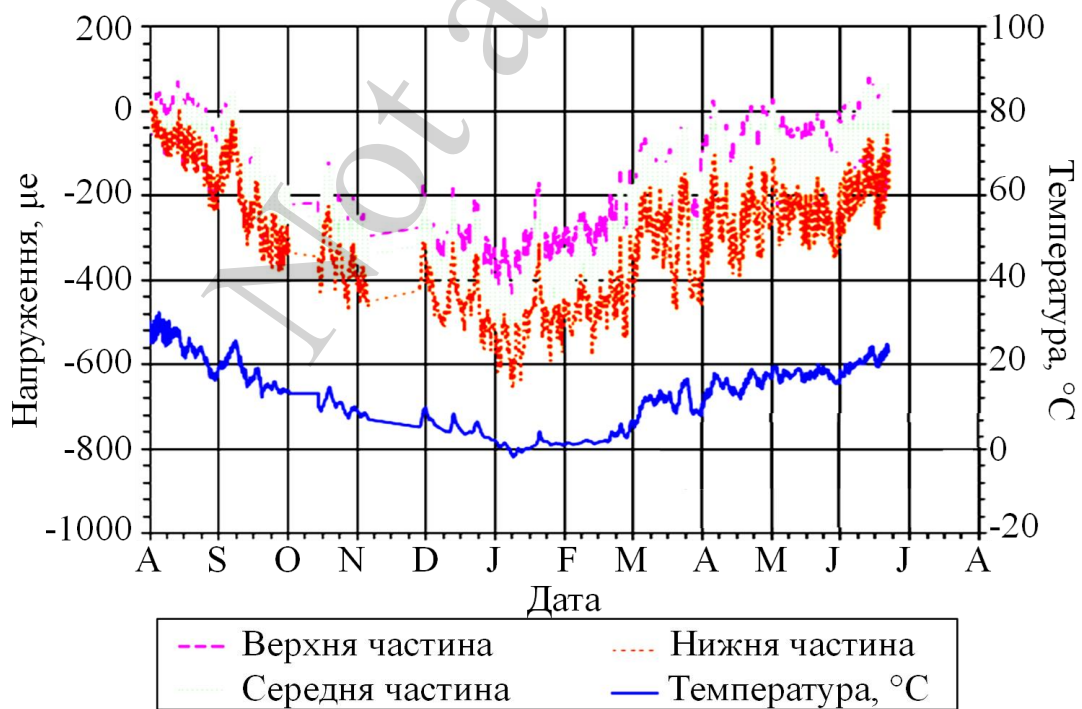


Рис. 3. Графік деформацій на верхній, середній та нижній поверхнях плити та температури повітря за даними вимірювань протягом одного року [16]

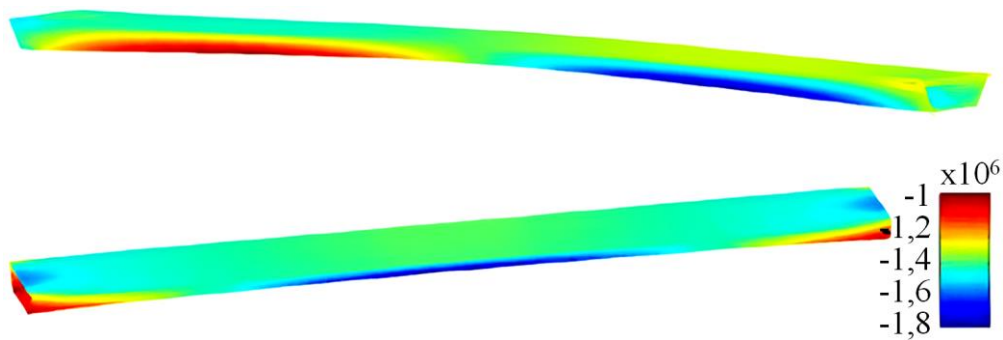


Рис. 4. Розподіл деформацій у повздовжньому напрямі балки при рівномірному підвищенні температури

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка комплексної методики визначення температурних полів та напружень підсиленої метилметакрилатними композиціями залізобетонної балки моста, що дасть можливість практичної оцінки термопружного стану балки моста.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання:

- визначити вхідні дані щодо числових досліджень температурного поля та напружень підсиленої залізобетонної балки;
- провести оцінку температурного поля підсиленої метилметакрилатом залізобетонної балки моста при дії додатних та від’ємних температур навколишнього середовища;
- провести оцінку термопружного стану підсиленої метилметакрилатом залізобетонної балки із врахуванням геометричних та фізико-механічних параметрів конструктивного підсилення.

4. Матеріали та методи дослідження

Розрахунок термопружного стану мостів проводиться у два етапи. На першому етапі розраховується розподіл температурного поля, а далі визначаються температурні напруження і деформації.

У праці [19] зазначено, що першим та дуже важливим етапом підготовки моделі до розрахунку є призначення розмірності. Також наведено одновимірну модель для оцінки температурних напружень підсиленої метилметакрилатом залізобетонної балки моста у залежності від товщини та модуля пружності конструктивного підсилення.

Модель теплопровідності.

Для оцінки температурного поля та напружень розглянуто двошарову модель, низ якої є шаром тонкого метилметакрилатного підсилення, а верх – нижньою полицкою залізобетонної балки моста (рис. 5).

Розглянуто прямокутну декартову систему координат $Oxyz$, в якій наведена модель займатиме область:

$$(V) = \{(x, y, z) : 0 \leq x \leq x_1, 0 \leq y \leq y_1, 0 \leq z \leq h\}, \quad (1)$$

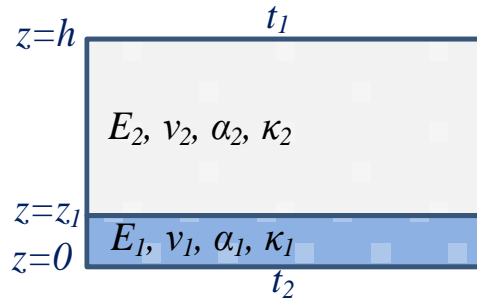


Рис. 5. Двошарова модель для розрахунку температурного поля та напружень підсиленої метилметакрилатом залізобетонної балки

Коефіцієнт теплопровідності двошарової моделі задаємо формулою (2):

$$k = \begin{cases} k_1 & \text{при } 0 \leq z \leq z_1, \\ k_2 & \text{при } z_1 < z \leq h. \end{cases} \quad (2)$$

Припустимо, що температура t у балці не залежить від часу та координат x , y . Тоді рівняння теплопровідності балки із підсиленням набуває вигляду [20]:

$$\frac{d}{dz} \left(k \frac{dt}{dz} \right) = 0. \quad (3)$$

Вважаємо, що на поверхнях $z=0$ і $z=h$ температурне поле двошарової моделі має значення:

$$t|_{z=0} = t_1, \quad t|_{z=h} = t_2, \quad (4)$$

а на поверхні $z=z_1$ виконуються умови ідеального теплового контакту між залізобетонною балкою і метилметакрилатним підсиленням, що відображаємо рівнянням:

$$t|_{z=z_1-0} = t|_{z=z_1+0}, \quad k_1 \frac{dt}{dz} \Big|_{z=z_1-0} = k_2 \frac{dt}{dz} \Big|_{z=z_1+0}, \quad (5)$$

Розв'язуючи рівняння (3) з урахуванням рівнянь (4), (5), отримаємо рівняння для знаходження розподілу температури у вертикальному напрямі підсиленої балки

$$t = \begin{cases} C_1 z + C_2, & 0 \leq z \leq z_1, \\ C_3 z + C_4, & z_1 < z \leq h, \end{cases} \quad (6)$$

де сталі інтегрування, які входять у рівняння (6) визначаємо із наступних виразів:

$$C_1 = \frac{t_2 - t_1}{z_1 + \frac{k_1}{k_2}(h - z_1)}; \quad C_2 = t_1;$$

$$C_3 = \frac{k_1}{k_2} C_1; \quad C_4 = t_2 - C_3 h. \quad (7)$$

Отже, визначивши сталі інтегрування із рівняння (7), за рівнянням (6) знаходимо розподіл температурного поля у двошаровій балці.

Далі розглянемо модель термопружного стану балки.

Модель термопружного стану підсиленої балки.

Нехай модуль пружності, коефіцієнт Пуассона і коефіцієнт лінійного теплового розширення метилметакрилатного підсилення та залізобетонної балки відповідно визначаються за формулами:

$$E = \begin{cases} E_1 & \text{при } 0 \leq z \leq z_1, \\ E_2 & \text{при } z_1 < z \leq h; \end{cases} \quad \nu = \begin{cases} \nu_1 & \text{при } 0 \leq z \leq z_1, \\ \nu_2 & \text{при } z_1 < z \leq h; \end{cases}$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 & \text{при } 0 \leq z \leq z_1, \\ \alpha_2 & \text{при } z_1 < z \leq h. \end{cases} \quad (8)$$

Припустимо, що температурне поле підсиленої балки визначається за формулою (6), а поверхні $z=0$ і $z=h$ вільні від навантажень. Інші поверхні підсиленої балки жорстко закріплені.

Для визначення напружено-деформованого стану підсиленої балки використаємо рівняння теорії термопружності. В цьому випадку переміщення за напрямками координатних осей x , y , компоненти тензора деформацій e_1 , e_2 , e_{12} , e_{13} , e_{23} та компоненти тензора напружень σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} дорівнюють нулю. Рівняння рівноваги підсиленої балки набуває вигляду:

$$\frac{d\sigma_3}{dz} = 0, \quad (9)$$

де σ_3 – компонента тензора напружень.

Із рівняння (9) з урахуванням крайових умов $\sigma_3|_{z=0}=0$, $\sigma_3|_{z=h}=0$ отримаємо

$$\sigma_3 = 0. \quad (10)$$

Оскільки $e_1=0$, $e_2=0$, $\sigma_3=0$ то співвідношення Дюамеля набувають вигляду

$$\frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) + \alpha t = 0, \quad \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) + \alpha t = 0, \quad (11)$$

де σ_1, σ_2 – компоненти тензора напружень.

Розв'язуючи систему рівнянь (11), знайдемо вирази для оцінки температурних напружень підсиленої залізобетонної балки:

$$\sigma_1 = -\frac{\alpha t E}{1-\nu}, \sigma_2 = -\frac{\alpha t E}{1-\nu}. \quad (12)$$

Отримані рівняння (12) дозволяють визначити термопружний стан підсиленої балки із врахуванням фізико-механічних параметрів матеріалу метилметакрилатного підсилення та балки і температури навколишнього середовища.

5. Результати розробки комплексної методики визначення температурних полів та напружень підсиленої метилметакрилатними композиціями залізобетонної балки моста

5.1. Вхідні дані щодо числових досліджень температурного поля та напружень підсиленої залізобетонної балки

Числові дослідження напружень підсиленої балки проведено за значень фізико-механічних параметрів залізобетонної балки та метилметакрилатного підсилення, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1.

Фізико-механічні характеристики залізобетонної балки та метилметакрилатного підсилення

№ п/п	Назва характеристики	Значення	Розмірність
1	Прийняті модулі пружності метилметакрилатного підсилення, E_1	5000, 10000, 15000	МПа
2	Модуль пружності залізобетонної балки, E_2	$3,6 \cdot 10^4$	МПа
3	Прийнятий коефіцієнт Пуансона метилметакрилатного підсилення, ν_1	0,3	–
4	Коефіцієнт Пуансона залізобетонної балки ν_2	0,25	–
5	Прийнятий коефіцієнт лінійного температурного розширення метилметакрилатного підсилення, α_1	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1/^\circ\text{C}$
6	Коефіцієнт лінійного температурного розширення залізобетонної балки, α_2	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1/^\circ\text{C}$
7	Прийнятий коефіцієнт теплопровідності метилметакрилатного підсилення, k_1	20	Вт/(м \cdot °C)
8	Коефіцієнт теплопровідності залізобетонної балки, k_2	19	Вт/(м \cdot °C)

Числові дослідження температурного поля підсиленої залізобетонної балки моста проведено при наступних значеннях геометричних параметрів моделі: $z=200$ мм; товщина покриття z_1 змінна: 10 мм, 15 мм та 20 мм.

При додатних температурах навколишнього середовища значення температури поверхні балки прийнято рівним $t_1=20\text{ }^\circ\text{C}$ та покриття рівним $t_2=30\text{ }^\circ\text{C}$, а при від'ємних температурах навколишнього середовища – відповідно $t_1=-15\text{ }^\circ\text{C}$ та $t_2=-10\text{ }^\circ\text{C}$.

5. 2. Результати досліджень температурного поля у підсиленій залізобетонній балці

Результати досліджень температурного поля у залізобетонній балці із метилметакрилатним підсиленням при додатних та від'ємних температурах навколишнього середовища наведено на рис. 6.

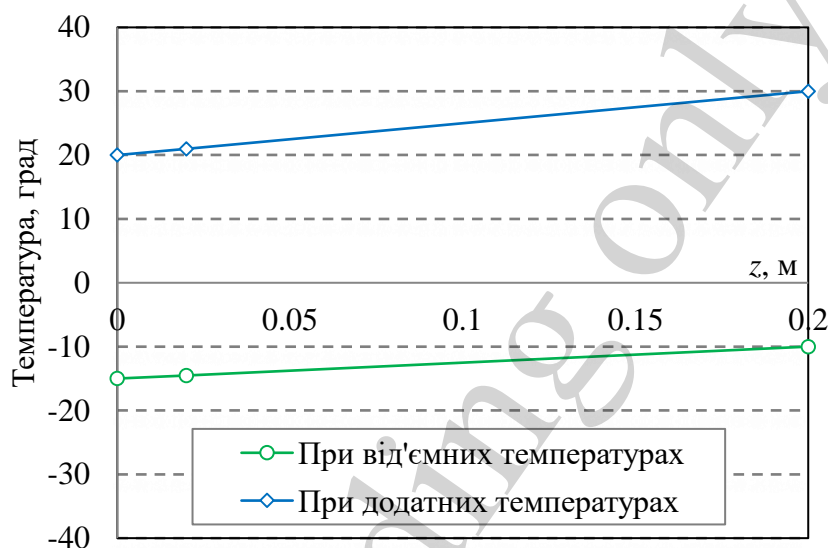


Рис. 6. Розподіл температурного поля у залізобетонній балці із метилметакрилатним підсиленням

Із рис. 6, видно, що температура розподіляється не рівномірно у вертикальному напрямі підсиленої залізобетонної балки. Вище значення температури має залізобетонна балка.

При додатних і від'ємних температурних перепадах навколишнього середовища температура метилметакрилатного підсилення становить відповідно $+20\text{ }^\circ\text{C}$ і $-15\text{ }^\circ\text{C}$, залізобетонної балки $+30\text{ }^\circ\text{C}$ і $-10\text{ }^\circ\text{C}$, а на контакті залізобетонної балки та метилметакрилатного підсилення спостерігається зміна градієнту температури.

Далі за відомими значеннями температурного поля проведемо оцінку термомпружного стану підсиленої залізобетонної балки моста. Дослідження проведено у залежності від геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей підсиленої балки, які наведено у табл. 1.

5. 3. Результати досліджень термомпружного стану у підсиленій залізобетонній балці

Результати дослідження напружень у підсиленій залізобетонній балці при додатних температурних перепадах навколишнього середовища наведено на

рис. 7–9. У даному випадку розподіл температурних напружень отримано у залежності від товщини та модуля пружності метилметакрилатного підсилення.

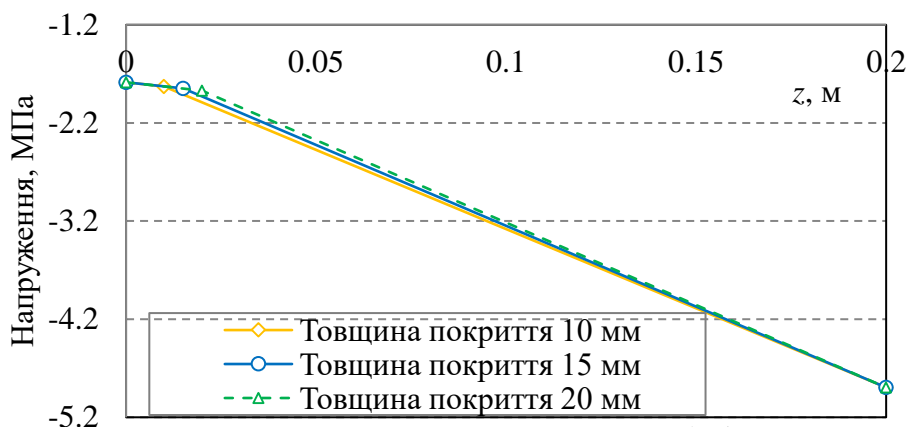


Рис. 7. Розподіл напружень у підсиленій залізобетонній балці при модулі пружності конструкційного підсилення $E=5000$ МПа і додатних температурах

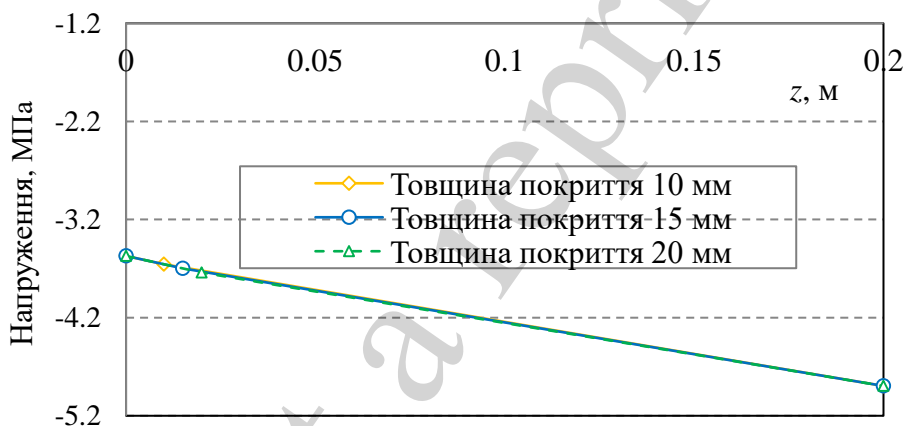


Рис. 8. Розподіл напружень у підсиленій залізобетонній балці при модулі пружності конструкційного підсилення $E=10000$ МПа і додатних температурах

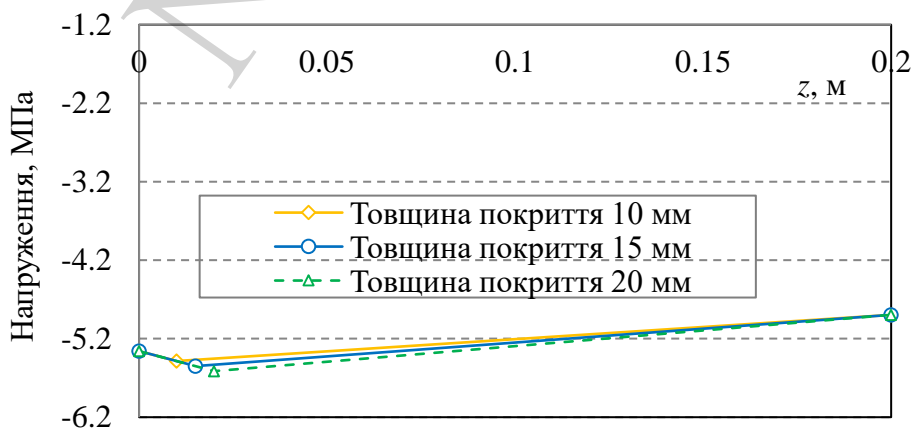


Рис. 9. Розподіл напружень у підсиленій залізобетонній балці при модулі пружності конструкційного підсилення $E=15000$ МПа і додатних температурах

Із приведених результатів розрахунку рис. 7–9 бачимо, що при додатних температурах навколишнього середовища на контакті залізобетонної балки та підсилення виникає зміна характеру розподілу температурних напружень. При цьому температурні напруження із збільшенням величини модуля пружності підсилення збільшуються. І так при товщині покриття 20 мм і при модулі пружності підсилення $E=5000$ МПа величина напружень на контакті підсилення-балка становить 1,87 МПа, при $E=10000$ МПа – 3,74 МПа, а при $E=15000$ МПа – 5,61 МПа.

На рис. 10–12 наведено розподіл напружень у залізобетонній балці із метилметакрилатним підсиленням при від’ємних температурах поверхонь.

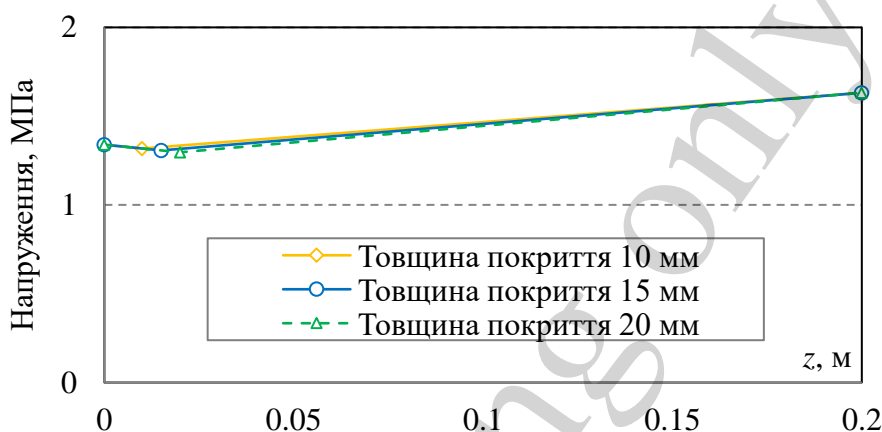


Рис. 10. Розподіл напружень у підсиленій залізобетонній балці при модулі пружності конструкційного підсилення $E=5000$ МПа і від’ємних температурах

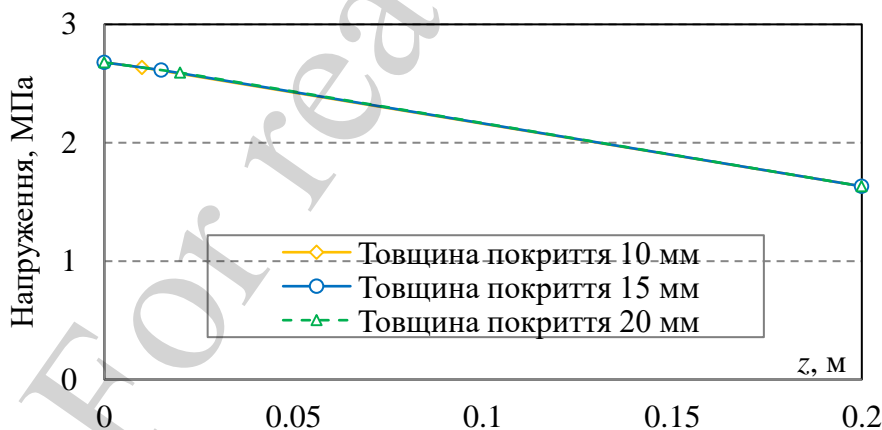


Рис. 11. Розподіл напружень у підсиленій залізобетонній балці при модулі пружності конструкційного підсилення $E=10000$ МПа і від’ємних температурах

Результати дослідження термопружного стану підсиленої метилметакрилатом залізобетонної балки показали, що як при додатних так і при від’ємних температурах навколишнього середовища на контакті балка-підсилення виникає зміна характеру розподілу температурних напружень (табл. 2).

Величина температурних напружень суттєво залежить від модуля пружності метилметакрилатного підсилення і мало залежить від його товщини. При

товщині покриття 20 мм і при модулі пружності покриття $E=5000$ МПа величина напружень на контакті покриття-балка становить 1,3 МПа, при $E=10000$ МПа – 2,59 МПа, а при $E=15000$ МПа – 3,89 МПа.

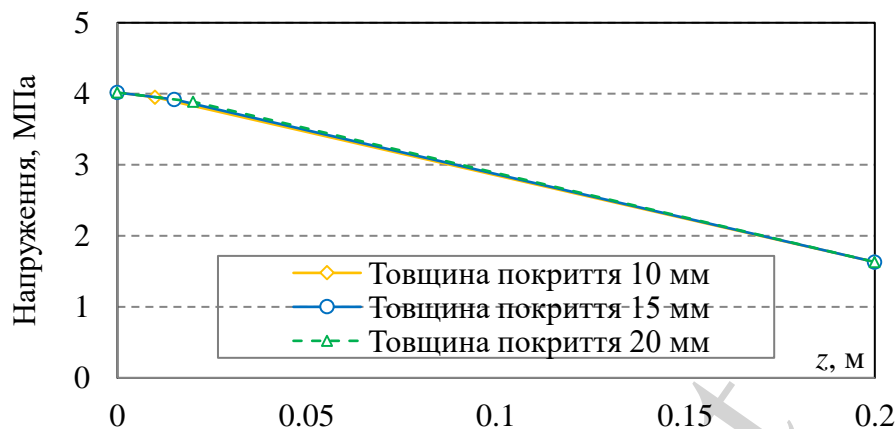


Рис. 12. Розподіл напружень у підсиленій залізобетонній балці при модулі пружності конструкційного підсилення $E=15000$ МПа і від’ємних температурах

Таблиця 2

Розподіл температурних напружень у підсиленій балці моста

Товщина покриття, мм	Модуль пружності покриття, МПа		
	5000	10000	15000
Напруження, МПа			
При дії додатних температур			
10	-1,83	-3,66	-5,48
15	-1,85	-3,70	-5,55
20	-1,87	-3,74	-5,61
При дії від’ємних температур			
10	1,32	2,64	3,95
15	1,31	2,61	3,92
20	1,30	2,59	3,89

6. Обговорення результатів оцінки термопружного стану підсиленої залізобетонної балки моста

Із проведених досліджень розподілу температури у вертикальному напрямі залізобетонної балки із покриттям (рис. 6) встановлено, що на контакті балка-підсилення виникає зміна градієнту температури. Це пояснюється різними фізико-механічними властивостями залізобетонної балки та метилметакрилатного підсилення (табл. 1). Вище значення температури має залізобетонна балка.

Слід зазначити, що товщина покриття не значно впливає на рівень температурних напружень на контакті балка-підсилення. Різниця отриманих значень напружень для балки із метилметакрилатним підсиленням товщиною 10 мм і 20 мм при модулі пружності $E=15000$ МПа становить до 3 % (табл. 2). Ця різниця виникає, як при додатних так і від’ємних температурах навколишнього середовища.

Проте, необхідно зазначити, що із підвищенням модуля пружності метилметакрилатного підсилення величина температурних напружень у контактній зоні балка-підсилення зростає. Так, величина термопружного стану балки із метилметакрилатним підсиленням висотою 20 мм при модулі пружності $E=5000$ МПа і $E=15000$ МПа і дії додатних та від'ємних температур навколишнього середовища збільшується у три рази (табл. 2). Цю особливість необхідно врахувати при виконанні підсилення дефектних залізобетонних балок мостів.

Одним із недоліків проведеного дослідження є відсутність реальних експериментальних даних розподілу температури по підсиленій залізобетонній балці, як у вертикальному так і повздовжньому напрямі балки моста. Тому подальший розвиток наукових досліджень планується виконувати із врахуванням розподілу температури по довжині підсиленої залізобетонної балки у двовимірній постановці задачі досліджень. Крім цього, дана модель дозволяє визначити термопружний стан підсилених балок тільки у вертикальному напрямі.

7. Висновки

1. Визначені дані для числових досліджень дозволяють виконати моделювання температурного поля та напружень підсиленої залізобетонної балки із врахуванням фізико-механічних параметрів матеріалу метилметакрилатного підсилення та балки, а також температури навколишнього середовища. Показано, що удосконалена модель має практичне застосування для оцінки температурних полів та напружень підсилених двошарових балок із врахуванням дії кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища.

2. Результати розподілу температурного поля у вертикальному напрямі підсиленої залізобетонної балки моста показали, що при додатних і від'ємних температурних перепадах навколишнього середовища температура метилметакрилатного підсилення становить відповідно $+20$ °С і -15 °С, залізобетонної балки $+30$ °С і -10 °С, а на контакті залізобетонної балки та метилметакрилатного підсилення спостерігається зміна градієнту температури. Це явище зумовлено різними фізико-механічними характеристиками конструкційних матеріалів балки та метилметакрилатного підсилення.

3. На контактній поверхні залізобетонній балки і метилметакрилатного підсилення відбувається зміна характеру розподілу температурних напружень по висоті балки. Величина напружень у контактній зоні при додатних температурах склала $-5,61$ МПа, а при від'ємних $-3,95$ МПа. Встановлено, що товщина покриття не має значного впливу на підвищення температурних напружень, проте збільшення модулю пружності покриття призводить до підвищення температурних напружень у контакті залізобетонної балки із метилметакрилатним підсиленням. При різниці товщини покриття у 10 мм напруження у контакті балка-підсилення при модулі пружності покриття $\Delta E=15000$ МПа збільшуються до 3 %, а при різниці модулів пружності у $\Delta E=10000$ МПа величина температурних напружень збільшується у три рази.

Література

1. Міст через р. Західний Буг на дорозі Н-17: що вже зроблено для відновлення руху. URL: https://ukravtodor.gov.ua/press/news/mist_cherez_r_zakhidnyi_buh_na_doroz_i_n-17__shcho_vzhe_zrobleno_dlia_vidnovlennia_rukhu.html
2. Усиление строительных конструкций низковязкими полимерами на основе метилметакрилата. URL: <https://injectir.ru/usilenie-konstrukciy>
3. Gera, B., Kovalchuk, V. (2019). A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (99)), 26–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168260>
4. De Backer, H., Outtier, A., Van Bogaert, P. (2009). Numerical and experimental assessment of thermal stresses in steel box girders. *Nordic Steel Construction Conference, 11th, Proceedings*, 65–72.
5. Burdet, O. L. (2010) Thermal Effects in the Long-Term Monitoring of Bridges. Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and Urbanised areas. 34th International symposium on bridge and structural engineering. Venice. URL: <https://infoscience.epfl.ch/record/163104>
6. Xia, Y., Chen, B., Zhou, X., Xu, Y. (2012). Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior. *Structural Control and Health Monitoring*, 20 (4), 560–575. doi: <https://doi.org/10.1002/stc.515>
7. Yan, Y., Wu, D., Li, Q. (2018). A three-dimensional method for the simulation of temperature fields induced by solar radiation. *Advances in Structural Engineering*, 22 (3), 567–580. doi: <https://doi.org/10.1177/1369433218795254>
8. Mussa, F. I., Abid, S. R., Taysi, N. (2021). Design Temperatures for Composite Concrete-Steel Girders: A-Verification of the Finite Element Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1090 (1), 012108. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1090/1/012108>
9. Peng, G., Nakamura, S., Zhu, X., Wu, Q., Wang, H. (2017). An experimental and numerical study on temperature gradient and thermal stress of CFST truss girders under solar radiation. *Computers and Concrete*, 20 (5), 605–616. doi: <https://doi.org/10.12989/cac.2017.20.5.605>
10. Sanio, D., Mark, P., Ahrens, M. A. (2017). Temperaturfeldberechnung für Brücken. *Beton- Und Stahlbetonbau*, 112 (2), 85–95. doi: <https://doi.org/10.1002/best.201600068>
11. Wang, G., Zhou, X., Ding, Y., Liu, X. (2021). Long-Term Monitoring of Temperature Differences in a Steel Truss Bridge with Two-Layer Decks Compared with Bridge Codes: Case Study. *Journal of Bridge Engineering*, 26 (3), 05020013. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001681](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001681)
12. Berg, M., Trouillet, P. (1988). Ouvrages d'art-actions et sollicitations thermiques. *Bulleitein de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 155.
13. Солодкий, С. Й., Васьків, Н. О. (2009). Температурно-вологісні умови експлуатації як чинник впливу на тріщиностійкість бетону. *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій*, 8, 278–288.
14. Dilger, W. H., Ghali, A., Chan, M., Cheung, M. S., Maes, M. A. (1983). Temperature Stresses in Composite Box Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*

neering, 109 (6), 1460–1478. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1983\)109:6\(1460\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1983)109:6(1460))

15. Prakash Rao, D. S. (1986). Temperature Distributions and Stresses in Concrete Bridges. *Journal Proceedings*, 83 (4), 588–596.

16. Lange, D. A., Roesler, J. R., D'Ambrosia, M., Grasley, Z. C., Lee, C. J., Cowen, D. R. (2003). High Performance Concrete For Transportation Structures. *Civil Engineering Studies*. URL: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/46278>

17. Balmes, E., Corus, M., Siegert, D. (2006). Modeling thermal effects on bridge dynamic responses. In *Proceedings of the 24th international modal analysis conference (IMAC-XXIV)*.

18. Kovalchuk, V., Onyshchenko, A., Fedorenko, O., Habrel, M., Parneta, B., Voznyak, O. et. al. (2021). A comprehensive procedure for estimating the stressed-strained state of a reinforced concrete bridge under the action of variable environmental temperatures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (110)), 23–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228960>

19. Kovalchuk, V., Hnativ, Y., Luchko, J., Sysyn, M. (2020). Study of the temperature field and the thermo-elastic state of the multilayer soil-steel structure. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 19 (1), 65–78. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.004>

20. Лучко, Й. Й., Гнатів, Ю. М., Ковальчук, В. В. (2013). Дослідження температурного поля та напруженого стану прогонової будови сталезалізобетонного моста. *Вісник тернопільського національного технічного університету*, 2, 29–38.