

© В. І. Гуляєв, докт. техн. наук,
професор,
ORCID: 0000-0002-5388-006X,
e-mail: valerygulyayev@gmail.com;
© В. В. Мозговий, докт. техн. наук, професор,
ORCID: 0000-0002-1032-8048,
e-mail: mozgoviy@gmail.com;
© Н. В. Шлюнь, канд. техн. наук,
доцент,
ORCID: 0000-0003-1040-8870,
e-mail: nataliyashlyun@gmail.com
Національний транспортний університет

© Valery Gulyayev, Doctor of Technical
Sciences, Professor,
ORCID: 0000-0002-5388-006X,
e-mail: valerygulyayev@gmail.com;
© Volodymyr Mozgovyy, Doctor of Technical
Sciences, Professor,
ORCID: 0000-0002-1032-8048,
e-mail: mozgoviy@gmail.com;
© Natalia Shlyun, Ph.D., Associate Professor,
ORCID: 0000-0003-1040-8870,
e-mail: nataliyashlyun@gmail.com
National Transport University

ЧОМУ В ДЕЯКИХ РЕГІОНАХ У КОНСТРУКЦІЯХ МОСТІВ ЗАБОРОНЕНО СТАЛЕВА АРМАТУРА З ЕПОКСИДНИМ ПОКРИТТЯМ?

WHY ARE EPOXY-COATED STEEL REBARS PROHIBITED IN BRIDGE STRUCTURES IN SOME REGIONS?

Анотація. Обговорюється термомеханічний механізм порушення внутрішньоструктурної цілісності бетону, армованого сталевими стрижнями з епоксидним покриттям, що обумовлений високим значенням його коефіцієнта лінійного термічного розширення та власне епоксидного покриття. Із застосуванням методів теорії термопружності розроблена математична модель цього явища, сформована система розв'язувальних диференціальних рівнянь, побудований її розв'язок. Встановлено, що навіть за порівняно незначних змін температури в середовищі бетону в зоні його контакту з арматурою виникають тріщини та пошкодження по всій довжині сталеві арматури. Це все сприяє подальшим деструктивним процесам і зменшенню довговічності залізобетонних мостових конструкцій.

Ключові слова: армований бетон, епоксидне покриття, корозійне пошкодження, термомеханічна несумісність, термонапруження.

Abstract. One of the common ways in many countries to protect steel reinforcement from corrosion in reinforced concrete structures is to cover its surface with a thin layer of epoxy resin. However, in practice, in many cases, the anti-corrosion effect of epoxy coating was not significant, and the durability of reinforced concrete bridge structures was lower than those where steel reinforcement was not coated with epoxy resin. Experts believe that one of the factors that affects the corrosion resistance of steel reinforcement with epoxy coating in reinforced concrete is the presence of mechanical damage in the epoxy coating of the reinforcing rod, through which moisture can penetrate. Therefore, in some countries, instructions have been developed for the prevention of such damage at the stages of applying an epoxy coating to the armature, its storage, transportation, and construction and assembly work in the manufacture of reinforced concrete structures. This article discusses the thermomechanical mechanism of violation of the internal structural integrity of concrete reinforced with steel rods with an epoxy coating, which is caused by a high value of its coefficient of linear thermal expansion and the epoxy coating itself. Using the methods of the theory of thermoelasticity, a mathematical model of this phenomenon was developed, a system of solving differential equations was formed, and its solution was constructed. It was established that even with relatively minor temperature changes in the concrete environment in the area of its contact with the reinforcement, cracks and damages occur along the entire length of the steel reinforcement. All this contributes to further destructive processes and reducing the durability of reinforced concrete bridge structures.

Keywords: reinforced concrete, epoxy coating, corrosion damage, thermomechanical incompatibility, thermal stress.

Вступ

Залізобетон – композитний матеріал, в якому відносно мала міцність при розтягуванні. Низька деформативність його цементобетонної матриці компенсуються сталеві арматурою з високими показниками цих якостей. Оскільки

міцність цементобетону при розтягуванні приблизно в 10 разів менша його міцності при стисканні, залізобетонні конструкції проєктують так, щоб стискаючі сили в них сприймав бетон, а сили розтягу – сталеві арматура. Водночас залізобетон володіє ще однією особли-

вістю, пов'язаною з тим, що коефіцієнти термічного лінійного розширення його компонентів і сталеві арматури приблизно однакові, тому в ньому не зароджуються додаткові внутрішньоструктурні термонапруження, викликані їх термомеханічною несумісністю.

Однак, під час експлуатації залізобетонних конструкцій в умовах підвищеної вологості їх довговічність може значною мірою зменшуватися в результаті корозії сталеві арматури [5, 8, 11, 12, 18]. Оскільки об'єм продуктів корозії сталі в 20÷30 разів більше її вихідного об'єму, то в бетоні, в зоні кородуючої сталеві арматури, утворюється джерело різнобічного тиску на бетон, що викликає дію значних сил розтягу, які перевищують його міцність та такі, що викликають у ньому відколювання та тріщини. Через ці тріщини до зони корозії надходять нові порції води, швидкість корозії та тріщиноутворення зростає і механічний зв'язок між бетоном та арматурою втрачається. Щоб мінімізувати процес корозійної деградації залізобетону в шістдесяті роки минулого сторіччя в США сталеву арматуру почали вкривати ізолюючим епоксидним шаром, сподіваючись довести довговічність конструкцій до 100 років. Стверджувалось, що епоксидний шар надає йому підвищену адгезію зі сталлю, він надійно ізолює сталь від взаємодії з електро-хімічними елементами та іонами солей і запобігає їй корозії.

Однак, швидко виявились і недоліки покривання епоксидним шаром сталеві арматури. Виявилось, що це призводить до зменшення на 35% загальної сили зчеплення між бетоном та арматурою [19]. Крім того стверджується [14, 15], що найбільшим недоліком епоксидного шару є його легка пошкодженість у процесі нанесення на стрижень та під час складування готової арматури, її відвантаження, транспортування, розвантаження, будівельно-монтажних робіт при виготовленні залізобетонних конструкцій. У результаті виявляється, що навіть найдрібніші пошкодження у формі раковин, подряпин або тріщин створюють стимулюючий

вплив на процес корозії, епоксидний шар відшаровується та ржавіння арматури з епоксидним шаром починає відбуватись навіть більш інтенсивніше ніж у разі непокритого стрижня сталеві арматури. У зв'язку з цим, для арматури з покриттям були розроблені додаткові інструкції та стандарти по спеціальній очистці її поверхні перед обробкою та способом відвантаження-розвантаження, транспортування та бетонування в польових умовах. Проте ефективність цих заходів продовжувала залишатися вкрай низькою. Натурні спостереження та контроль за мостовими залізобетонними конструкціями в приморських умовах свідчили про те, що стрижні сталеві арматури з епоксидним покриттям, які використовувались, більшою мірою піддаються корозійній руйнації, ніж непокриті стрижні. За свідченням Групи спостереження за мостами Міністерства транспорту в Онтаріо (Канада) [14] декілька мостових споруд з арматурою з епоксидним покриттям вже ремонтувалися, не перевищивши навіть 20-річного терміну експлуатації, хоча для багатьох з них закладався мінімальний термін експлуатації в 75 років.

У зв'язку з тим, що вказаний механізм антикорозійного захисту не забезпечує навіть її 30-річної довговічності, у багатьох регіонах США та Канади він заборонений або не рекомендований до використання. У Флориді (США) він заборонений у 1979 р., у штаті Орегон – у 1988 р., не рекомендований до використання в штаті Вірджинія, а також у провінції Квебек та Онтаріо (Канада) з 2000 р.

Тим не менше, в наукових публікаціях почала з'являтися інформація про те, що антикорозійний захист арматури з епоксидним покриттям не поступається захисту арматури без покриття. У статті [16] відмічається, що, починаючи з 1986 р., у Флориді контрольним спостереженням підлягала група з 12-ти мостів, побудованих між 1975 та 1991 роками. Було встановлено, що тільки перші початкові ознаки корозії стали спостерігатись у п'яти мостів на шостий рік експлуатації, які потім продовжува-

ли прогресувати. Ще у чотирьох мостів прогресуюча корозія була виявлена після 20 років експлуатації.

У статтях [3, 9] відмічається, що за аналізом корозії мостів, що містили арматуру з епоксидним покриттям, повинні бути зібрані додаткові дані, оскільки найстаріші з них експлуатуються всього лише 40 років і тільки у деяких з них виявлені корозійні дефекти, а в статті [4] стверджується, що взагалі арматура з епоксидним покриттям краща від непокритої арматури.

Беручи до уваги розбіжність інформації про вплив епоксидного шару на антикорозійний захист арматури, необхідно зазначити ще одну особливість. Справа в тому, що корозійні дефекти в арматурі з покриттям переважно спостерігались у регіонах Канади та США з великими сезонними перепадами температури. При тому внутрішньоструктурні термонапруження в матеріалі з непокритою арматурою виявили практично нечуттєвими до цих перепадів, оскільки цементобетон та сталь мають практично однакові значення коефіцієнтів лінійного температурного розширення (КЛТР) $\alpha_1 \approx 1 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{K}$ і тому їх термічні деформації сумісні [17]. Однак ситуація суттєвим чином змінюється, якщо між бетоном та сталлю розташувати епоксидний прошарок, КЛТР якого

$\alpha_2 \approx 5 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{K}$ в п'ять разів перевищує α_1 . Тому, як показали розрахунки авторів [1, 7], навіть за умови помірних перепадів температури на міжфазних (інтерфейсних) поверхнях такого композиту виникають концентратори додаткових внутрішньоструктурних термонапружень, що значно перевищують міцність матеріалу матриці. Викликані ними термопошкодження поширюються вздовж армуючого сталевго стрижня та можуть бути каналами для перенесення вологи по всій його довжині. Цей ефект може сприяти ініціюванню та активізації корозійних процесів у системі. Нижче наведено теоретичне моделювання цього ефекту на основі методів теорії термопружності.

Основна частина

Цементобетон, армований сталевими стрижнями з епоксидним покриттям, це трифазний композит. Для аналізу його внутрішньоструктурних термонапружень, викликаних несумісністю термомеханічних параметрів його компонент, виділимо стрижень 1 з покриттям 2, оточений середовищем цементобетонної матриці 3 (рис. 1), та методами термопружності дослідимо деформування системи за зміни температури на величину T .

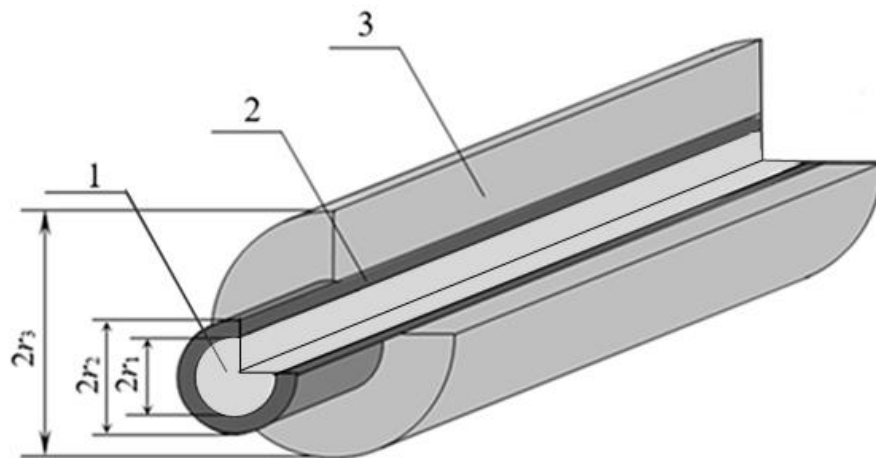


Рис. 1. Схема включення 1, покритого шаром 2, в середовищі матриці 3

1

Термомеханічні властивості фаз системи визначаються їхніми модулями

пружності E_i , коефіцієнтами Пуассона

ν_i , границями міцності на розтягування $[\sigma]_i$ та коефіцієнта лінійного термічного розширення (КЛТР) α_i . Для сталюго стрижня 1, епоксидного покриття 2 та цементобетонної матриці 3 вони складають, відповідно: $E_1 = 210$ ГПа, $\nu_1 = 0,3$, $[\sigma]_1 = 250 \div 2600$ МПа, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$; $E_2 = 3,8 \div 5,8$ ГПа, $\nu_2 = 0,33$, $[\sigma]_2 = 40 \div 80$ МПа, $\alpha_2 = 5,5 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$; $E_3 = 30 \div 50$ ГПа, $\nu_3 = 0,2$, $[\sigma]_3 = 2 \div 5$ МПа, $\alpha_3 = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$. Основна особливість цих даних полягає в тому, що КЛТР епоксидного шару більш ніж у 5 разів перевищує цю величину для сталі та бетону, а бетон має вкрай низьку міцність при розтягуванні.

Відмітимо, що вказану задачу термопружності зручніше формулювати за допомогою параметрів пружності Ляме λ та μ , виражаючи їх через E та ν , використовуючи рівності:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (1)$$

Для обчислення використовується циліндрична система координат $O\varphi z$, в якій r та φ – радіальна та колова координати, відповідно, вісь Oz напрямлена вздовж осі стрижня 1.

Розв'язувальні рівняння системи виражаються через рівняння кожної фракції композита [1, 2, 10]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u^{(1)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(1)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(1)} &= 0 \quad (0 \leq r \leq r_1), \\ \frac{d^2 u^{(2)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(2)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(2)} &= 0 \quad (r_1 \leq r \leq r_2), \\ \frac{d^2 u^{(3)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(3)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(3)} &= 0 \quad (r \geq r_2), \end{aligned} \quad (2)$$

де $u^{(i)}$ ($i=1,2,3$) радіальне переміщення пружного елемента.

Розв'язок рівнянь (2) має вигляд [7]:

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= rC_1 + \frac{1}{r}C_2 \quad (0 \leq r \leq r_1), \\ u^{(2)}(r) &= rC_3 + \frac{1}{r}C_4 \quad (r_1 \leq r \leq r_2), \\ u^{(3)}(r) &= rC_5 + \frac{1}{r}C_6 \quad (r \geq r_2), \end{aligned} \quad (3)$$

де C_i ($i=\overline{1,6}$) – константи, що визначаються з умов на граничних поверхнях:

$$\begin{aligned} u^{(1)}(0) &= 0, \\ u^{(1)}(r_1) &= u^{(2)}(r_1), \\ \sigma_r^{(1)}(r_1) &= \sigma_r^{(2)}(r_1), \\ u^{(2)}(r_2) &= u^{(3)}(r_2), \\ \sigma_r^{(2)}(r_2) &= \sigma_r^{(3)}(r_2), \\ \sigma_r^{(3)}(r_3) &\rightarrow 0 \quad \text{при } r_3 \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут $\sigma_r^{(i)}(r)$ ($i=\overline{1,3}$) – радіальні термонапруження. Разом з коловими термонапруженнями $\sigma_\varphi^{(i)}(r)$ вони обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i)\varepsilon_r^{(i)} + \\ &\quad + \lambda_i\varepsilon_\varphi^{(i)} - (3\lambda_i + 2\mu_i)\alpha_i T, \\ \sigma_\varphi^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i)\varepsilon_\varphi^{(i)} + \\ &\quad + \lambda_i\varepsilon_r^{(i)} - (3\lambda_i + 2\mu_i)\alpha_i T, \end{aligned} \quad (5)$$

$(i=\overline{1,3}).$

Відносні деформації $\varepsilon_r^{(i)}(r)$, $\varepsilon_\varphi^{(i)}(r)$, що тут використовуються, виражаються через переміщення:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(i)}(r) &= \frac{du^{(i)}}{dr}, \\ \varepsilon_\varphi^{(i)}(r) &= \frac{u^{(i)}}{r}, \end{aligned} \quad (6)$$

$(i=1,2,3)$

З першого та останнього співвідношень системи (4) випливає:

$$\begin{aligned} C_2 &= 0, \\ C_5 &= \frac{(3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_3 \Delta T}{2(\lambda_2 + \mu_2)} \end{aligned} \quad (7)$$

За допомогою рівностей (5), (6) чотири рівняння, що залишилися, системи (4), зводяться до вигляду

$$\begin{aligned}
r_1 C_1 &= r_1 C_3 + \frac{1}{r_1} C_4, \\
2(\lambda_1 + \mu_1) C_1 - (3\lambda_1 + 2\mu_1) \alpha_1 T &= \\
= 2(\lambda_2 + \mu_2) C_3 - \frac{2\mu_2}{r_1^2} C_4 - \\
- (3\lambda_2 + 2\mu_2) \alpha_2 T, \\
r_2 C_3 + \frac{1}{r_2} C_4 &= r_2 \frac{(3\lambda_3 + 2\mu_3) \alpha_3 T}{2(\lambda_3 + \mu_3)} + \frac{1}{r_2} C_6, \\
2(\lambda_2 + \mu_2) C_3 - \frac{2\mu_2}{r_2^2} C_4 - \\
- (3\lambda_2 + 2\mu_2) \alpha_2 T &= - \frac{2\mu_3}{r_2^2} C_6
\end{aligned} \tag{8}$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= (\lambda_2 + \mu_2 + \mu_3), \\
a_{12} &= \frac{1}{r_2} (\mu_3 - \mu_2), \\
a_{21} &= [(\lambda_1 + \mu_1) - (\lambda_2 + \mu_2)], \\
a_{22} &= \frac{1}{r_1^2} (\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2), \\
b_1 &= \frac{T}{2} \left[\frac{\mu_3}{(\lambda_3 + \mu_3)} (3\lambda_3 + 2\mu_3) \alpha_3 + (3\lambda_2 + 2\mu_2) \alpha_2 \right], \\
b_2 &= \frac{T}{2} [(3\lambda_3 + 2\mu_3) \alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2) \alpha_2].
\end{aligned} \tag{9}$$

За їх допомогою із системи (8) можна отримати:

$$\begin{aligned}
C_3 &= \frac{b_1 a_{22} - b_2 a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}, \\
C_4 &= \frac{a_{11} b_2 - a_{21} b_1}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}, \\
C_1 &= C_3 + \frac{1}{r_1^2} C_4, \\
C_6 &= - \frac{r_2^2 (\lambda_2 + \mu_2)}{\mu_3} C_3 + \\
&+ \frac{\mu_2}{\mu_3} C_4 + \frac{r_2^2 (3\lambda_2 + 2\mu_2)}{2\mu_3} \alpha_2.
\end{aligned} \tag{10}$$

Із рівнянь (3), (5)-(7), (9), (10) випливають вирази для термонапружень у фракціях 1-3:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{(1)}(r) &= \sigma_\varphi^{(1)}(r) = 2(\lambda_1 + \mu_1) C_1 - \\
&- (3\lambda_1 + 2\mu_1) \alpha_1 T \quad (0 \leq r \leq r_1), \\
\sigma_r^{(2)}(r) &= 2(\lambda_2 + \mu_2) C_3 - \frac{2\mu_2}{r^2} C_4 - \\
&- (3\lambda_2 + 2\mu_2) \alpha_2 T \quad (r_1 \leq r \leq r_2), \\
\sigma_\varphi^{(2)}(r) &= 2(\lambda_2 + \mu_2) C_3 + \frac{2\mu_2}{r^2} C_4 - \\
&- (3\lambda_2 + 2\mu_2) \alpha_2 T \quad (r_1 \leq r \leq r_2), \\
\sigma_r^{(3)}(r) &= - \frac{2\mu_3}{r^2} C_6 \quad (r \geq r_2), \\
\sigma_\varphi^{(3)}(r) &= \frac{2\mu_3}{r^2} C_6 \quad (r \geq r_2).
\end{aligned} \tag{11}$$

Використовуючи їх можна обчислити функції (11) при заданих параметрах $\lambda_i, \mu_i, \alpha_i$ ($i = \overline{1,3}$). Їхні величини, що виражені через наведені вище значення E_i, ν_i ($i = \overline{1,3}$) за допомогою формул (1), склали: $\lambda_1 = 121,2$ ГПа, $\mu_1 = 80,77$ ГПа, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ 1°C , $\lambda_2 = 4,233$ ГПа, $\mu_2 = 2,18$ ГПа, $\alpha_1 = 5,5 \cdot 10^{-5}$ 1°C , $\lambda_3 = 13,89$ ГПа, $\mu_1 = 20,83$ ГПа, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ 1°C .

Підкреслимо, що оскільки $\alpha_1 = \alpha_3$, у відсутності епоксидного шару додаткові внутрішньоструктурні термонапруження в залізобетоні при зміні його температури дорівнюють нулю. Однак, додавання до системи епоксидного шару з підвищеним значенням α_2 вносить суттєві зміни у розподілення полів додаткових термонапружень.

У **табл. 1** наведені значення термонапружень в граничних точках $r = 0, r = r_1$ та $r = r_2$ системи при зміні температури від 0°C до $T = -30^\circ \text{C}$ для випадків $r_1/r_2 = 0,9; 0,95$ та $0,98$, в яких товщини h шарів епоксидного покриття склали $h = 0,1r_2; 0,05r_2$ та $0,02r_2$, де r_2 – радіус армуючого стрижня з епоксидним покриттям.

Таблиця 1
Значення термонапружень
 $\sigma_r^{(i)}(r), \sigma_\phi^{(i)}(r)$ ($i = \overline{1,3}$) в граничних
точках композиту за $T = -30^\circ \text{C}$

$\sigma_r^{(i)}(r),$ $\sigma_\phi^{(i)}(r)$ МПа	$\frac{r_1}{r_2} = 0,9$	$\frac{r_1}{r_2} = 0,95$	$\frac{r_1}{r_2} = 0,98$
$\sigma_r^{(1)}(0) = \sigma_r^{(1)}(r_1)$	7,179	4,695	2,732
$\sigma_\phi^{(1)}(0) = \sigma_\phi^{(1)}(r_1)$	7,179	4,695	2,732
$\sigma_r^{(2)}(r_1)$	7,179	4,695	2,732
$\sigma_\phi^{(2)}(r_1)$	11,292	14,135	13,133
$\sigma_r^{(2)}(r_2)$	7,967	5,161	2,937
$\sigma_\phi^{(2)}(r_2)$	9,042	13,675	12,927
$\sigma_r^{(3)}(r_2)$	7,967	5,161	2,937
$\sigma_\phi^{(3)}(r_2)$	-7,967	-5,161	-2,937

Графіки функцій $\sigma_r^{(i)}(r), \sigma_\phi^{(i)}(r)$ для випадку $r_1/r_2 = 0,9$ наведені на рис. 2. Як видно, функція $\sigma_r(r)$ є ламаною, функція $\sigma_\phi(r)$ – розривною.

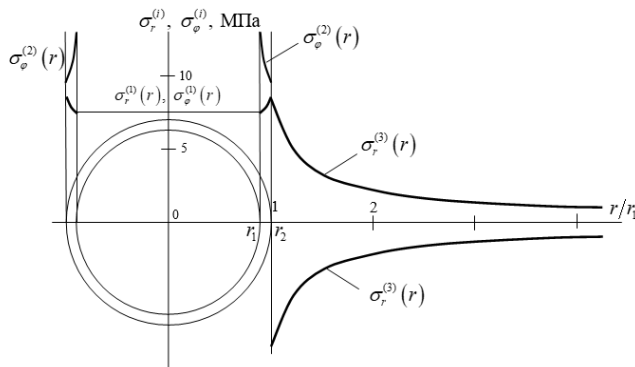


Рис. 2. Графіки розподілу термонапружень $\sigma_r^{(i)}(r), \sigma_\phi^{(i)}(r)$ (МПа) в композиті при $r_1/r_2 = 0,9, T = -30^\circ \text{C}$

Аналіз цих результатів свідчить про те, що у всіх випадках за вибраної температури $T = -30^\circ \text{C}$ термонапруження у сталевому стрижні 1 та епоксидному шарі 2 далекі від граничних, однак, у бетонному середовищі вони перевищують її границі міцності. Причому за від'ємних значень T радіальні напруження виявляються розтягуючими, а

колові – стискаючими. Це означає, що викликані термопошкодження реалізуються у вигляді колових тріщин та відшарувань в бетоні (рис. 3-а). Оскільки ці напруження швидко спадають (рис. 2), тріщини, що виникли, концентруються в малому околі поверхні $r = r_2$, вони виявляються короткими в коловому напрямі, але розташовуються вздовж всієї довжини стрижня. Все це сприяє поступовій деструкції структурних зв'язків цементобетону з арматурою, у зв'язку з тим що волога може проникати у бетон розповсюджуючись також по всій його довжині, заповнюючи при цьому такі дефекти.

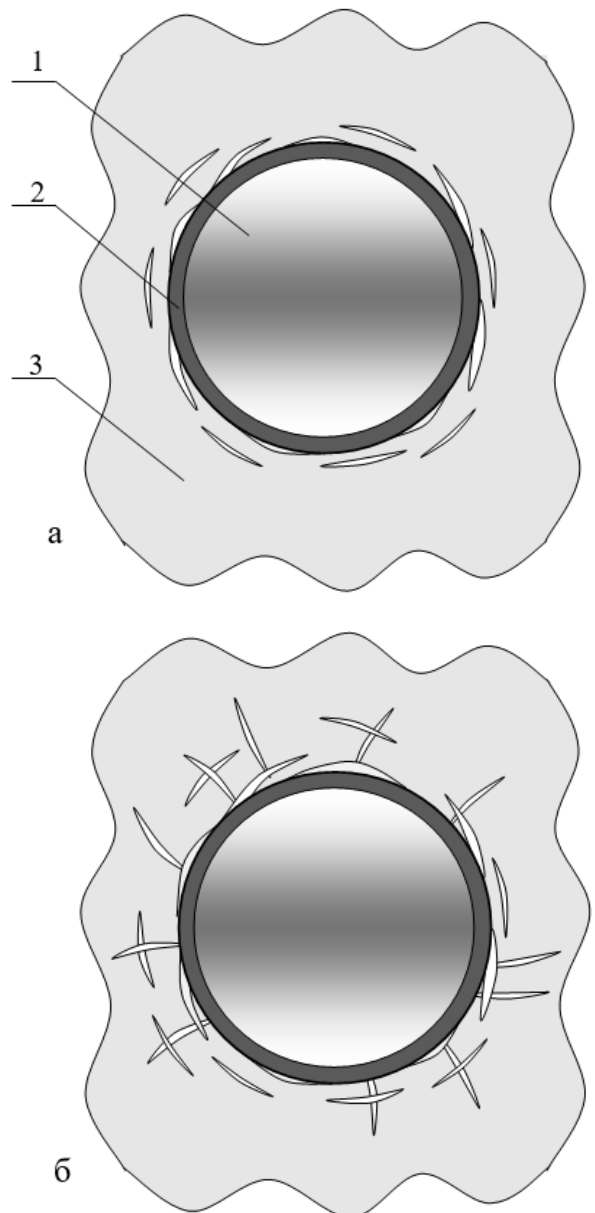


Рис. 3. Схеми утворення термопошкоджень в цементобетонній матриці в околі епоксидного покриття

Ці явища супроводжуються додатковими механічними ефектами [6, 13] при зміні знаку температури T з від'ємного до додатного. У цьому випадку термонапруження у бетоні в околі арматури також можуть досягати граничних значень, однак цього разу радіальні напруження виявляються стискаючими, а колові розтягуючими. Це призводить до виникнення в бетоні додаткових радіальних тріщин (рис. 3-б), порушенню цілісності бетону в цій зоні, втраті зв'язку між епоксидним шаром та бетоном та зміні механізму наступної термомеханічної взаємодії фаз системи. Цей механізм розглядається нижче.

Моделювання термонапружень в епоксидному покритті за умови втрати його зв'язку з бетоном

Проаналізуємо випадок, коли, як показано вище, в результаті багатократних знижень і підвищень температури системи термопошкодження в бетоні супроводжуються порушеннями, його цілісності поблизу епоксидного шару та втраті механічного зв'язку між ними. Тоді при термічній оцінці термонапруженого стану епоксидного покриття можна вважати, що контактні напруження на поверхні його дотику з бетоном рівні нулю і для обчислення виділити тільки сталевий стрижень 1 з епоксидним покриттям 2.

Окрім того, такий механізм термонапруження реалізується в армуючому стрижні до його додавання в бетонну масу, наприклад, при зберіганні арматури, її транспортуванні та виконанні вантажно-розвантажувальних робіт.

У цьому випадку із системи рівнянь (2) залишаються тільки два перші рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u^{(1)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(1)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(1)} &= 0 \quad (0 \leq r \leq r_1), \\ \frac{d^2 u^{(2)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(2)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(2)} &= 0 \quad (r_1 \leq r \leq r_2). \end{aligned} \quad (12)$$

Вони мають розв'язок:

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= rC_1 + \frac{1}{r}C_2 \quad (0 \leq r \leq r_1), \\ u^{(2)}(r) &= rC_3 + \frac{1}{r}C_4 \quad (r_1 \leq r \leq r_2). \end{aligned} \quad (13)$$

Константи C_i ($i = \overline{1,4}$), що тут використовуються, знаходяться з крайових умов:

$$\begin{aligned} u^{(1)}(0) &= 0, & u^{(1)}(r_1) &= u^{(2)}(r_1), \\ \sigma_r^{(1)}(r_1) &= \sigma_r^{(2)}(r_1), & \sigma_r^{(2)}(r_2) &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Виразимо дану систему через константи:

$$\begin{aligned} C_2 &= 0, \\ r_1 C_1 &= r_1 C_3 + \frac{1}{r_1} C_4, \\ 2(\lambda_1 + \mu_1)C_1 - (3\lambda_1 + 2\mu_1)\alpha_1 T &= \\ = 2(\lambda_2 + \mu_2)C_3 - \frac{2\mu_2}{r_1^2} C_4 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2 T, \\ 2(\lambda_2 + \mu_2)C_3 - \frac{2\mu_2}{r_2^2} C_4 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2 T &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Ця система зводиться до вигляду:

$$\begin{aligned} C_3 &= \frac{\mu_2}{r_2^2(\lambda_2 + \mu_2)} C_4 + \frac{r_2^2(3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2 T}{2(\lambda_2 + \mu_2)}, \\ C_1 - \frac{\mu_2 r_1^2 + (\lambda_2 + \mu_2)r_2^2}{r_1^2 r_2^2 (\lambda_2 + \mu_2)} C_4 &= \frac{(3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2 T}{2(\lambda_2 + \mu_2)}, \\ C_1 - \frac{\mu_2(r_1^2 - r_2^2)}{r_1^2 r_2^2 (\lambda_1 + \mu_1)} C_4 &= \frac{(3\lambda_1 + 2\mu_1)\alpha_1 T}{2(\lambda_1 + \mu_1)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Вона має розв'язок

$$\begin{aligned} C_4 &= \left[\frac{(3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2 T}{2(\lambda_2 + \mu_2)} - \frac{(3\lambda_1 + 2\mu_1)\alpha_1 T}{2(\lambda_1 + \mu_1)} \right] \times \\ & \times \frac{r_1^2 r_2^2 (\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}{\left[(r_1^2 - r_2^2)\mu_2(\lambda_2 + \mu_2) - (\lambda_1 + \mu_1)(r_1^2 \mu_2 - r_2^2 \lambda_2 - r_2^2 \mu_2) \right]}, \quad (17) \\ C_1 &= \frac{(r_1^2 - r_2^2)}{r_1^2 r_2^2} \frac{\mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)} C_4 + \frac{(3\lambda_1 + 2\mu_1)\alpha_1 T}{2(\lambda_1 + \mu_1)}, \\ C_3 &= \frac{\mu_2}{r_2^2(\lambda_2 + \mu_2)} C_4 + \frac{(3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2 T}{2(\lambda_2 + \mu_2)}. \end{aligned}$$

Значення термонапружень, обчислених для такої конструкційної моделі за $r_1/r_2 = 0,9; 0,95; 0,98$ та $T = -30^\circ \text{C}$, наведені в табл. 2.

Таблиця 2
**Значення термонапружень $\sigma_r^{(i)}(r)$,
 $\sigma_\phi^{(i)}(r)$ ($i=1,2$) в граничних точках
 сталю стержня з епоксидним по-
 криттям за $T = -30^\circ\text{C}$**

$\sigma_r^{(i)}(r)$, $\sigma_\phi^{(i)}(r)$ МПа	$\frac{r_1}{r_2} = 0,9$	$\frac{r_1}{r_2} = 0,95$	$\frac{r_1}{r_2} = 0,98$
$\sigma_r^{(1)}(0) = \sigma_r^{(1)}(r_1)$	-1,169	-0,588	-0,234
$\sigma_\phi^{(1)}(0) = \sigma_\phi^{(1)}(r_1)$	-1,169	-0,588	-0,234
$\sigma_r^{(2)}(r_1)$	-1,169	-0,588	-0,234
$\sigma_\phi^{(2)}(r_1)$	11,148	11,445	11,624
$\sigma_r^{(2)}(r_2)$	0,0	0,0	0,0
$\sigma_\phi^{(2)}(r_2)$	9,970	10,8589	11,390

Як видно, термонапруження в епоксидному шарі такої конструкції за заданої температури дещо перевищує ці значення для випадку, коли стержень перебуває в середині цементобетонного середовища (табл. 1). Однак, вони циклічно змінюються і можуть скласти помітну добавку до експлуатаційних (також циклічно діючих) напружень і стають причиною швидкого пошкодження його шару. В такому разі антикорозійний ефект зникає, сталеві арматура кородує, що супроводжується відповідними негативними наслідками

Отже, наведені вище результати досліджень продемонстрували можливі причини зменшення довговічності мостових залізобетонних конструкцій при застосуванні сталевих арматур з епоксидним покриттям за рахунок комплексної дії деструктивних факторів, викликаних термомеханічним механізмом порушення внутрішньоструктурної цілісності бетону та епоксидного покриття, що обумовлений високим значенням його КЛТР, порівняно із значеннями КЛТР бетону та сталюї арматури.

Висновки

1. Розглянуті питання зниженої корозійної стійкості мостових бетонних конструкцій, армованих сталевими стержнями з епоксидним покриттями

та обумовленої цим ефектом заборони такої арматури в мостобудуванні деяких регіонів американського континенту. Виражено припущення про зв'язок встановленого феномену з додатковими внутрішньоструктурними термоушкодженнями, спричиненими суттєвою несумісністю термомеханічних параметрів сталі, епоксидної смоли та цементобетону.

2. Із застосуванням методів термопружності розроблено математичну модель і виведено диференціальні рівняння, що описують пружне деформування цементобетонного середовища, що містить сталевий армуючий стержень з епоксидним покриттям за заданою зміни температури. Побудовано розв'язок цих рівнянь.

3. Встановлено, що навіть за помірних змін температури внутрішньоструктурні термонапруження в цементобетоні, що обумовлені високим значенням коефіцієнта лінійного термічного розширення епоксидної смоли, можуть помітно перевищувати його границю міцності і призводити до тріщин та пошкоджень. Ці пошкодження локалізовані в околі інтерфейсної поверхні. Вони можуть поширюватися вздовж усієї довжини стержня і служити каналами для підведення води до епоксидного шару та суттєвого погіршення морозостійкості в результаті замерзання води в таких місцях, у результаті – відшарування цементобетону від арматури. Втрата цілісності конструкції у цій зоні в подальшому, в умовах експлуатаційного навантаження може призводити і до пошкоджень в епоксидному шарі, сприяючи інтенсивній корозії арматури. В будь-якому разі термоушкодження цементобетону, спричинені термодетформаціями епоксидного покриття, суттєво знижують міцність усієї конструкції.

References

1. Huljaiev V. I., Haidachuk V. V., Mozghovyi V. V., Zaiets Yu. O., Shevchuk L. V., Shliun N. V. (2018). Termoprzhnyi stan bahatosharovykh dorozhnikh pokryttiv [Thermoe-lastic state of multilayer road surfaces.]. Kyiv, NTU, 272. [in Ukrainian].

2. Kovalenko, A. D. (1970). *Osnovy termopruzhnosti [Thermoelasticity fundamentals]*. Kyiv, Naukova Dumka, 239. [in Russian].
3. Agrawal A. K., et.al. (2010). Deterioration rates of typical bridge elements in New York. *Journ. Brid. Eng.*, 15, 4, 419-429. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000123)
4. Boatman B. (2010). *Epoxy Coated Rebar Bridge Decks: Expected Service Life*. Michigan Department of Transportation: Lansing, MI.
5. Deepak Kamde, Radhakrishna Pillai. (March 2021). Corrosion initiation mechanisms and service life estimation of concrete systems with fusion-bonded epoxy (FBE) coated steel exposed to chloride. *Constr. Build. Mater.*, V.277, 122314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122314>
6. Elwardany M. D., King G., Planche J. P., Rodezno C., Christensen D., Fertig Ill R. S., Kuhn K. H., Bhuiyan F. H. (2019). Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage, *Asphalt Paving Technol: J. Assoc. Asphalt Paving Technol*, 88.
7. Gulyayev V. I., Mozgovyi V. V., Shlyun N. V., Shevchuk L. V. (2022). Modelling negative thermomechanical effects in reinforced road structures with thermoelastic incompatibility of coating and reinforcement materials. *System Research and Information Technologies*. 2. pp.117-127. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2022.2.09>
8. Han-Seung Lee, Velu Saraswathy, Seung-Jun Kwon and Subbiah Karthick. (2017). Corrosion inhibitors for reinforced concrete: A review/ In book: *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*. Edited by Mahmood Aliofkhaezrai. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72572>.
9. Hatami A., Marcous G. (2012). Developing Deterioration Models for Life Cycle Cost Analysis of Nebraska Bridges, *Journal of the Transportation Research Board*, 2313, 1, 3-11. <https://doi.org/10.3141/2313-01>
10. Hetnarski R.B. and Ignaczak J. (2004). *Mathematical Theory of Elasticity*, Taylor and Francis, New York.
11. Jorge de Briton, Rawaz Kurda. (2021). The past and future of sustainable concrete: A critical review and strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*. 281, 123558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>
12. Mc Donald B. B. (2016). Corrosion of epoxy-coated steel in concrete. In book: *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. Edited by Amiz Pouzsaee. Woodhead Publishing, 87-110.
13. Elwardany M., Planche , J.-P., King G. (2020). Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced damage, *Construction and Building Materials*, 255, 119331, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119331>
14. Pianca F., Schell H., Gene Cautillo. (2005). The performance of epoxy coated reinforcement: experience of the Ontario Ministry of Transportation. *International Journal of Materials and Product Technology*, 23, 3/4, 286-308. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2005.007732>
15. Robert Caputo. (10 Oct., 2021). Region Manager – New York and Washington DC Metro areas at Western Speciality Contractors. Epoxy coated rebar – “To coat or not to coat?”.
16. Sagues A. A., Lau K., Powers R. G., Kessler R. J. Corrosion of epoxy-coated rebar in marine bridges – A 30 year perspective. Paper № 4039. 17th International Corrosion Congress – Corrosion Control in the Service of Society. Las Vegas, 2009.
17. Takenaka K. (2012). Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion, *Science and Technology of Advanced Materials*. 13, 1-11.
18. Xianming Shi. (2018). Monitoring of reinforced concrete corrosion // In book: *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, 69-95. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00004-6>
19. Xiaofei Pei, Martin Noel, Mark Green, Greg W.R. Sheir. (Feb., 2017). Cementitious coatings for improved corrosion resistance of steel reinforcement. *Surface Coating Technolog*, 315, 188-195. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.036>.