

УДК 629.463.001.63

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-27>

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕРМІЧНОГО ПОПЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА МЕХАНІЧНУ РОБОТУ БАЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА СТАДІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ

Фомін Олексій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри вагонів та вагонної споруди
Навчально-наукового Київського інституту залізничного транспорту
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

Бурлуцький Олексій Вікторович,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерного моделювання
та інтегрованих технологій обробки тиском
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

Іщенко Вадим Миколайович,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри вагонів та вагонної споруди
Навчально-наукового Київського інституту залізничного транспорту
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0002-5559-4251

Красулін Олександр Станіславович,

старший викладач кафедри транспортних технологій підприємств
Державного вищого навчального закладу
«Приазовський державний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0001-8919-3264

Третяк Валентина Іванівна,

провідний фахівець відділу аспірантури та докторантури
Національного університету «Запорізька політехніка»
ORCID ID: 0009-0003-5548-6394

У статті представлено результати математичного моделювання зворотного вигину хребтової балки від температурного навантаження під час виготовлення залізничного вагона й оцінка впливу термічного попереднього навантаження на механічну роботу балкових елементів транспортних конструкцій на стадії технологій виготовлення.

Сучасні транспортні конструкції постійно піддаються різноманітним експлуатаційним навантаженням, серед яких значне місце посідають температурні коливання. Ці коливання можуть призводити до виникнення термічних напружень у матеріалах, особливо в балкових елементах, що є основними несучими компонентами. Попереднє термічне навантаження, тобто циклічні температурні впливи, що відбуваються до прикладення основного експлуатаційного навантаження, може суттєво змінювати механічні характеристики матеріалів і, як наслідок, впливати на загальну працездатність та довговічність конструкції.

Зворотний вигин від дії температурного навантаження – це фундаментальне явище, обумовлене генерацією залишкових термомеханічних напружень унаслідок нерівномірного нагріву / охолодження та подальшої пластичної деформації. Його обов'язково враховують у технологічних процесах, пов'язаних із високими температурами під час виготовлення.

За результатами отриманої математичної моделі для визначення попереднього вигину хребтової балки напіввагона, можна зробити такі висновки:

1. Зменшення величини початкового вигину на стадії виготовлення балки внаслідок деяких втрат попереднього напруження становить від 14 до 23 %, залежно від місця прикладання термічного навантаження P .
2. Зворотний вигин балки, попередньо напруженої вигином двотавра, знижує величину прогину від дії зварювальних деформацій порівняно з прогином звичайної балки від 23 до 31 %.

Ключові слова: транспорт, рухомий склад, технології виготовлення, життєвий цикл, автоматизація, комп'ютерне моделювання, термічний зворотний вигин.

Fomin Oleksii, Burlutsky Oleksii, Ishchenko Vadym, Krasulin Oleksandr, Tretyak Valentyna.
Assessment of the impact of thermal preloading on the mechanical performance of beam elements of transport structures at the manufacturing stage

The article presents the results of a mathematical model for calculating the reverse bending of a spine beam from thermal loading during the manufacture of a railway carriage and an assessment of the impact of thermal preloading on the mechanical performance of beam elements of transport structures at the manufacturing stage.

Modern transport structures are constantly subjected to various operational loads, among which temperature fluctuations play a significant role. These fluctuations can lead to thermal stresses in materials, especially in beam elements, which are the main load-bearing components. Preliminary thermal loading, i.e. cyclic temperature effects that occur before the main operational load is applied, can significantly change the mechanical characteristics of materials and, as a result, affect the overall performance and durability of the structure.

Reverse bending due to thermal loading is a fundamental phenomenon caused by the generation of residual thermomechanical stresses as a result of uneven heating/cooling and subsequent plastic deformation. It must be taken into account in technological processes involving high temperatures during manufacturing.

As a result of the mathematical model obtained to determine the preliminary bending of the semi-wagon's spine beam, the following conclusions can be drawn.

1. The reduction in the initial deflection during the beam manufacturing stage due to some loss of prestressing is between 14 and 23 %, depending on the location of the thermal load P .
2. The reverse deflection of a beam pre-stressed by bending reduces the amount of deflection due to welding deformations in relation to the deflection of a conventional beam by 23 to 31 %.

Key words: transport, rolling stock, manufacturing technologies, life cycle, automation, computer modelling, thermal reverse bending.

Вступ. Сучасні транспортні конструкції, як-от рухомий склад залізниць, каркаси водних засобів, естакади й елементи літаків, постійно піддаються різноманітним навантаженням. Серед цих навантажень особливе місце посідають термічні впливи. Температурні коливання, що виникають унаслідок ремонтних навантажень і зміни кліматичних умов, сонячної радіації чи роботи двигунів, можуть значно впливати на роботу балкових елементів. Балки є одними з основних несучих елементів у багатьох транспортних системах, і їхня надійна робота є критично важливою для безпеки експлуатації.

Недооцінка впливу термічного попереднього навантаження може призвести до непередбачених деформацій, розвитку внутрішніх напружень і навіть руйнування конструкцій. Це, зі свого боку, несе загрозу для життя та здоров'я людей, а також може спричинити значні економічні збитки. Особливо це актуально для конструкцій з великими прольотами, де термічні деформації можуть бути значними. Дослідження впливу термічного попереднього навантаження дасть змогу краще розуміти поведінку матеріалів і конструкцій у реальних умовах.

Крім того, питання актуальне в контексті зміни клімату, що призводить до більш екстремальних температурних коливань. Проектування конструкцій без врахування цих факторів може

призвести до скорочення терміну їх служби. Науково-прикладне дослідження дасть змогу розробити більш точні методи розрахунку та прогнозування поведінки балкових елементів. Це сприятиме оптимізації проєктних рішень і зниженню ризиків під час експлуатації.

Дослідження також має значення для розробки нових матеріалів із покращеними термічними властивостями. Розуміння механізмів впливу температури допоможе створювати більш стійкі та довговічні конструкції. Це дослідження є важливим кроком до підвищення надійності транспортної інфраструктури. Його результати можуть бути використані для вдосконалення будівельних норм і стандартів.

Також актуальність зумовлена необхідністю моніторингу стану існуючих конструкцій. Оцінка впливу термічного попереднього навантаження дасть можливість своєчасно виявляти потенційно небезпечні ділянки, а отже, проводити превентивні заходи та ремонтні роботи, запобігаючи аваріям. Дослідження також є важливим для розробки інтелектуальних систем моніторингу для відстежування температурних деформацій у реальному часі.

Накопичені знання із цього дослідження будуть корисними для інженерів-проєктувальників, будівельних організацій та експлуатуючих компаній, дадуть можливість приймати

обґрунтовані рішення щодо вибору матеріалів, конструктивних схем і технологій будівництва. Це також сприятиме зменшенню витрат на ремонт та обслуговування транспортних споруд.

Без проведення таких досліджень інженери будуть змушені спиратися на приблизні розрахунки або застарілі дані, що підвищує ризики. Отже, це дослідження є необхідним для подальшого розвитку транспортної галузі. Воно забезпечить більш високий рівень безпеки й ефективності транспортних систем. Результати можуть також знайти застосування в інших галузях промисловості, де використовуються аналогічні балкові конструкції. Це може бути машинобудування, енергетика або будівництво висотних споруд.

Таким чином, науково-прикладне дослідження є вкрай актуальним. Воно має велике теоретичне та практичне значення. Його результати сприятимуть підвищенню надійності, безпеки та довговічності транспортних споруд. Інвестиції в подібні дослідження – це інвестиції в майбутнє та сталий розвиток інфраструктури. Такий підхід дасть змогу запобігти катастрофічним наслідкам і забезпечити безперебійну роботу транспортних мереж.

Методи та методики дослідження. Метою цього науково-прикладного дослідження є оцінка впливу термічного попереднього навантаження на експлуатаційні характеристики балкових елементів транспортних конструкцій. Робота спрямована на встановлення закономірностей зміни механічних властивостей матеріалів і несучої здатності балок під дією температурних змін. Дослідження дасть можливість встановити, як термічні деформації впливають на напружено-деформований стан і несучу здатність балкових елементів, що є критично важливим для забезпечення їх довговічності та безпеки експлуатації. Отримані результати будуть використані для розробки рекомендацій щодо проектування й експлуатації транспортних конструкцій з урахуванням температурних впливів.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі задачі:

- провести аналіз існуючих теоретичних моделей та експериментальних даних щодо впливу термічних напружень на несучу здатність і деформативність балкових елементів;
- розробити чисельну модель балкового елемента, яка дає змогу враховувати розподіл температурних полів та спричинені ними напруження;
- виконати серію чисельних експериментів для різних сценаріїв термічного попереднього навантаження, варіюючи інтенсивність та тривалість термічного впливу;

- здійснити аналіз отриманих результатів чисельного моделювання, зосереджуючись на зміні прогинів, напружень і частот власних коливань балкових елементів;

- визначити критичні параметри термічного навантаження, за яких спостерігається значне зниження експлуатаційних характеристик балкових елементів.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики. У статті [1] розроблено експериментальний стенд для дослідження термо-механічної поведінки залізобетонних балок. Методика теплового самодеформування дає змогу точно імітувати комбіновані навантаження, що актуально для мостових конструкцій. Результати демонструють зниження міцності на 15–20 % за циклічного нагрівання до 150 °С.

У роботі [2] теоретично й експериментально обґрунтовано параметри ємнісних накопичувачів для рухомого складу метро. Оптимізація системи показала збільшення енергоефективності на 25 % порівняно з традиційними акумуляторами. Дослідження має прикладне значення для енергозбереження в транспорті.

У науковій публікації [3] запропоновано нову теорію гомогенізації для трифазних композитів із вуглецевими волокнами. Модель враховує морфологічні особливості волокон, що дає змогу точніше передбачати модуль пружності (похибка $\leq 3\%$). Результати підтверджені експериментально для авіаційних конструкцій.

Роботу [4] присвячено дослідженню втомної поведінки балок зі сталевібробетону. Встановлено, що за 1 млн циклів прогин зростає на 35–40 %, а мікротріщини формуються переважно біля сталевих волокон. Запропоновано аналітичну модель для прогнозування деформацій.

Автори статті [5] визначили раціональні параметри ємнісних накопичувачів для підземного транспорту. Система з ККД 92 % дає можливість знизити енерговитрати на 18–22 %. Практичні випробування проведені на вагонах київського метро.

У статті [6] проаналізовано втомні характеристики сталевібробетонних балок. Показано, що пошкодження в з'єднаннях «сталь – бетон» знижує ресурс на 30–50 %. Для продовження терміну служби запропоновано посилення карбованими полотнами.

У публікації [7] розроблено математичну модель динамічного навантаження напіввагонів на паровах. Встановлено, що використання в'язких муфт зменшує ударні навантаження на 40 %. Результати верифіковані на стенді з імітацією хвиль 3–5 балів.

Автори роботи [8] дослідили вплив температурного навантаження (до 200 °C) на балки, посилені CFRP. Виявлено, що зони без зчеплення знижують ефективність посилення на 25–30 %. Оптимальний крок розміщення полотен – 50–70 мм.

У статті [17] автори розглядають формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів у виробництві гнутих профілів. Аналізуються фактори, що впливають на кількість переходів, для розробки схеми профілювання, вказано на неоднозначність, наприклад, фактора товщина металу. Ці фактори розділено на підгрупи: геометрія, матеріал, інші операції на лінії, характеристика стана. Отримані результати мають важливе значення для підвищення точності виготовлення машинобудівних конструкцій.

Авторами [10] досліджено зміни структури сталі після термічного навантаження. Показано, що нагрів до 600 °C призводить до зростання зерна на 30–50 %, що знижує межу текучості на 15 %. Запропоновано метод відновлення властивостей термообробкою.

У роботі [11] авторами експериментально вивчено поширення тріщин у з'єднаннях «шип – бетон». Швидкість росту тріщин зростає в 1,8 разу за циклічного навантаження > 10 кН. Критерій руйнування ґрунтується на J-інтегралі.

У статті [12] запропоновано математичний опис усадки для прогнозування деформацій конструкцій. Похибка моделі не перевищує 5 % порівняно з експериментальними даними. Метод апробований на мостових прогонах.

У публікації [13] проведено аналіз втомного ресурсу з'єднань у композитних балках. Виявлено критичну довжину тріщини (15–20 мм), за якої швидкість руйнування зростає експоненційно. Для продовження ресурсу запропоновано локальне посилення.

У роботі [14] досліджено чутливість сталевих конструкцій до втоми в разі згину. Найбільший вплив мають концентратори напружень (коефіцієнт чутливості 1,8–2,3). Оптимізація геометрії зменшує імовірність руйнування на 40 %.

У науковому дослідженні [15] оптимізовано хімічний склад сталі для стабілізації механічних властивостей. Додавання 0,3 % V і 0,5 % Cr зменшує чутливість до термічного впливу. Межа текучості після нагріву знижується лише на 8–10 %.

Авторами роботи [16] розроблено метод аналізу втоми обертових сталевих балок. Частота обертання > 500 об/хв призводить до зростання температури на 50–70 °C, що прискорює руйнування. Критерій базується на модифікованому законі Паріса.

Дослідниками в [17] вивчено деградацію залізобетону зі сталевими волокнами за втомного згину. Вміст волокон 1,5 % збільшує ресурс у 2 рази. Модель враховує накопичення мікротріщин за критерієм енергорозсіювання.

У роботі [18] доведено, що попередні пошкодження знижують несучу здатність балок на 35–40 %. Поєднання попереднього натягу та карбонових полотен відновлює 85 % міцності. Експерименти проведені за температур –20...+60 °C.

Авторами статті [19] досліджено залишкові напруження в балках, посилені 3D-друком. Аддитивні шари створюють стискаючі напруження до 150 МПа, що підвищує втомну міцність на 20 %. Метод термографії підтвердив результати.

Дисертаційна робота [20] присвячена вирішенню актуального наукового завдання – удосконалення технологій виробництва і ремонту вантажних вагонів. Обґрунтована доцільність застосування термічної правки як після зварювальної обробки зварних металоконструкцій вагонів. Сформульовано задачу оптимізаційного дослідження процесу термічної правки елементів вантажних вагонів у напрямі зниження їх залишкових деформацій, що мають місце під час їх виготовлення та ремонту. Але питання зворотного вигину від дії температурного навантаження як методу боротьби зі зварювальними деформаціями на стадії виробництва не розглядалося.

Аналіз літератури показав, що питанням оцінки впливу термічного попереднього навантаження на роботу балкових елементів транспортних конструкцій не приділено належної уваги. Наявні дослідження здебільшого фокусуються на інших аспектах навантаження, залишаючи цей критичний фактор недостатньо вивченим. Незважаючи на потенційну значущість термічних деформацій для довговічності та безпеки транспортних споруд, комплексних робіт, що системно аналізують їхній вплив, обмаль. Це створює суттєву прогалину в наукових знаннях та інженерній практиці, адже термічні навантаження можуть спричиняти значні додаткові напруження й деформації. Потреба в подальших дослідженнях у цій галузі є очевидною для розробки більш точних методів розрахунку та проєктування, що враховуватимуть реальні умови експлуатації. Це дасть змогу підвищити надійність та ефективність транспортних конструкцій загалом.

Виклад основного матеріалу. Хребтова балка виготовляється за базовою технологією шляхом зварювання зетових профілів,

які подаються за допомогою шлеперного пристрою на стенд першої збірки, де їх збирають на прихватках ручним дуговим зварюванням. Зі стенда першої збірки зібрані профілі передаються на стенд автозварювання, де заварюють основний зварювальний шов. Після закінчення операції зварювання хребтова балка за допомогою кантувача подається на стенд другої збірки, де в балку за розміткою встановлюють діафрагми й упори з підп'ятником [20].

На початковій стадії тавр згинається двома зосередженими силами P так, що по перетину елемента виникає зона чистого зсуву та чистого згину. При цьому балка отримує вигин f_0 .

Деталі, що входять до балки хребтової напіввагона: два зетові профілі та двотавр № 19 розміром 15 700 мм у довжину, 356 мм у ширину та 632 мм у висоту [12]. Для зетових профілів потрібно виконати такий перехід, як встановлення й базування, після чого вони

прихоплюються та приварюються. Для всіх деталей під час складання слід виконати операції встановлення та базування. Базова технологія складання балки хребтової проходить у складальному кондукторі, де також здійснюється прихваткування (рис. 1 та 2).

Суть пропонованого методу полягає у термічному створенні в матеріалі хребтової балки залишкових напруг, які викривляють балку в потрібному напрямку до початку зварювання. Після цього балка фіксується і проварюється. Завдяки такому підходу борються зі зварювальними деформаціями за допомогою технології попереднього вигину балки, що запобігає деформаціям після зварювання. Фізичну сутність прогину на стадії попереднього напруження термічним навантаженням показано на рис. 2, більш детально фізичну сутність описано в роботі [20].

Термічне попереднє напруження – це технологічний процес, за якого шляхом контрольованого

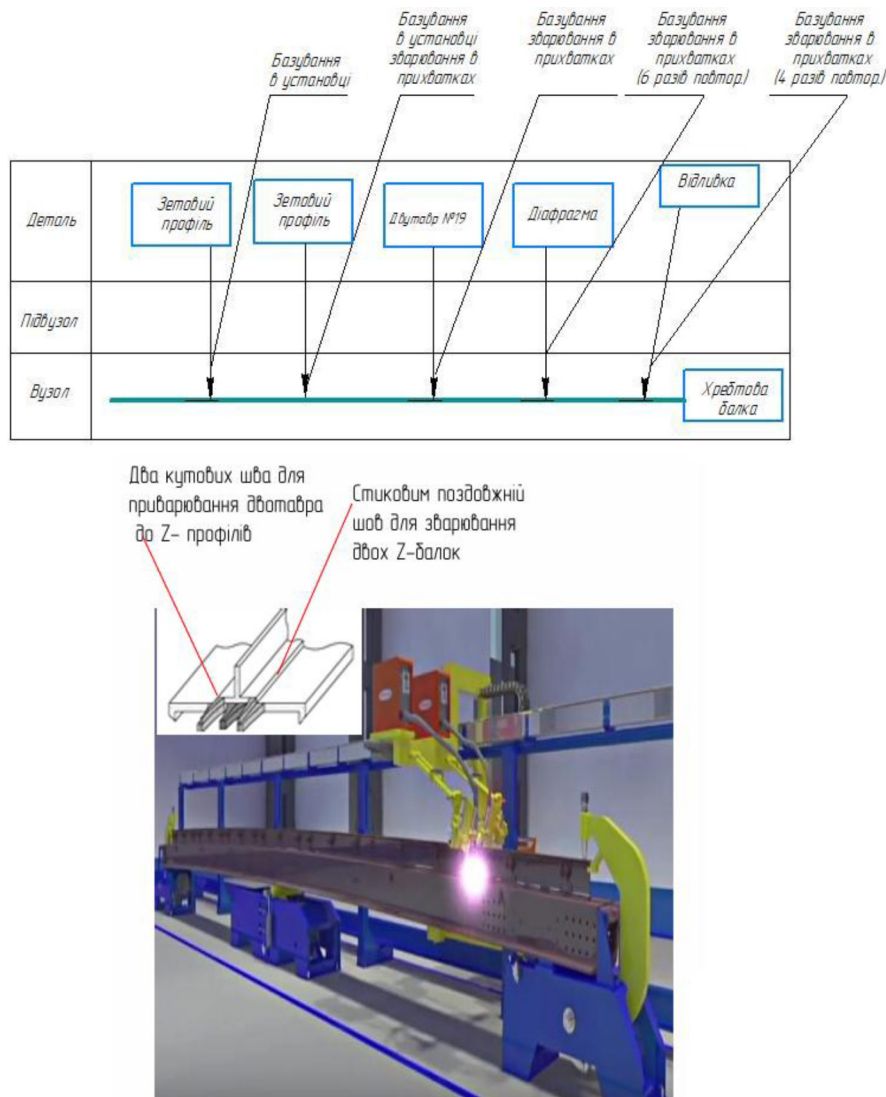


Рис. 1. Базова технологія виробництва балки хребтової без прогину на стадії попереднього напруження

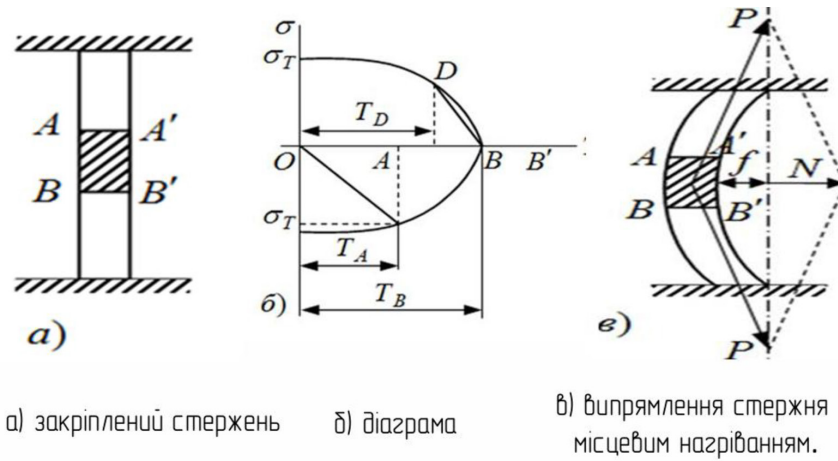


Рис. 2. Фізична сутність прогину на стадії попереднього напруження термічним навантаженням

нерівномірного нагріву / охолодження в конструкції створюються залишкові напруження, що викликають бажаний вигин (прогин).

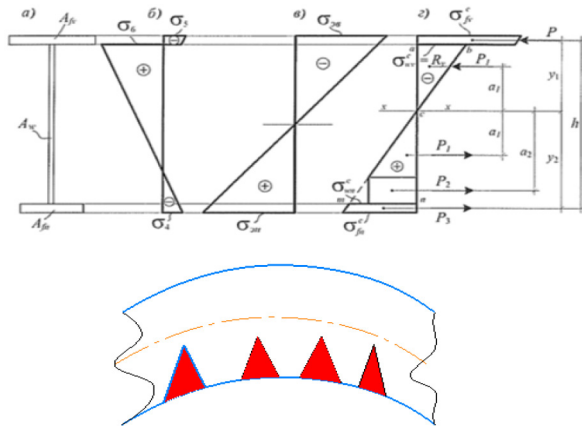


Рис. 3 Напружений стан двотавра № 19 хребтової балки на стадії виготовлення: а – схема поперечного перерізу двотавра № 19 хребтової балки під термічним навантаженням; б – результуюча епюра нормальних попередніх напружень; в – епюра нормальних напружень від термічного навантаження; г – епюра результуючих нормальних напружень

Для вирішення задачі щодо знаходження величини попереднього вигину балки на стадії виготовлення скористаємося диференціальним рівнянням вигнутої осі балки

$$d^2y/dx^2 = M_0/(E \cdot I_x), \quad (1)$$

де: $y(x)$ – шукана функція вигину (вертикальне переміщення перерізу);

x – координата вздовж осі балки;

$M(x)$ – функція згинального моменту в перерізі x ;

E – модуль пружності (модуль Юнга) матеріалу балки;

$I(x)$ – момент інерції поперечного перерізу балки відносно нейтральної осі. Якщо переріз постійний, то $I = \text{const}$.

Ліва частина (d^2y/dx^2) – це друга похідна функції зворотного вигину, яка математично виражає кривизну осі балки (κ).

Права частина ($M/(EI)$) – кривизна, обумовлена дією згинального моменту. Значення згинального моменту балки, якщо $x < a$, $M_x = P_x$, дорівнюватимуть

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{EI_x} \int M_x dx = -\frac{1}{EI_x} \int P_x dx = -\frac{1}{EI_x} \left(\frac{P_x^2}{2} + C_1 \right); \quad (2)$$

$$y = -\frac{1}{EI_x} \int \left(\frac{P_x^2}{2} + C_1 \right) dx = -\frac{1}{EI_x} \int \left(\frac{P_x^3}{6} + C_1 x + D_1 \right) dx; \quad (3)$$

якщо $x > a$, $M_x = P_x - P(x - a)$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= -\frac{1}{EI_x} \int (P_x - P(x - a)) dx = \\ &= -\frac{1}{EI_x} \left(\frac{P_x^2}{2} - \frac{P(x - a)^2}{2} + C_2 \right); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y &= -\frac{1}{EI_x} \int \left(\frac{P_x^2}{2} - \frac{P(x - a)^2}{2} + C_2 \right) dx = \\ &= -\frac{1}{EI_x} \int \left(\frac{P_x^3}{6} - \frac{P(x - a)^2}{2} + C_2 x + D_2 \right) dx. \end{aligned} \quad (5)$$

Приймаємо граничні умови $x = 0$; $y = 0$. За умови $x < a$ $D_1 = 0$.

Постійна інтегрування D_1 характеризує прогин осі стрижня. Оскільки прогин буде той самий за умови $x < a$; $P_x = M_x = ix > a$; $M_x = P_x - P(x - a)$, то можна записати, що $D_1 = D_2$. За умови $x > a$ прогин осі y буде максимальним, якщо $x = l/2$, поворот перетину можна записати як.

$$T_1 = \frac{dy}{dx} = 0. \quad (6)$$

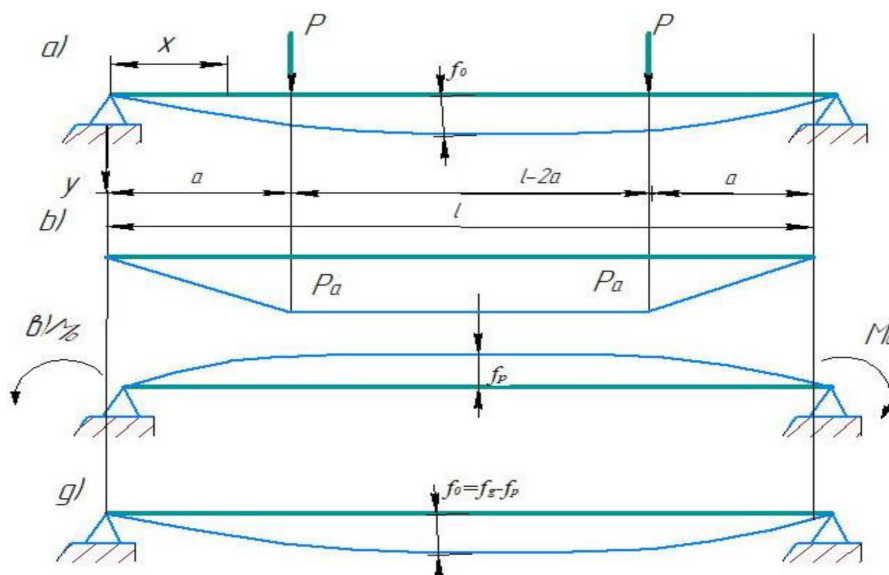


Рис. 4. Прогин хребтової балки на стадії попереднього напруження: а – схема завантаження й початковий вигин вихідного елемента на стадії виготовлення балки; б – епюра згинальних моментів на стадії виготовлення балки; в – згинальний момент і прогин двотавра після зняття зусилля попереднього напруження; г – результуючий вигин двотавра на стадії попереднього напруження

Ця умова матиме вигляд:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{EI_x} \left(\frac{P l^2}{24} - \frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - a \right)^2 + C_2 \right) = 0; \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{P}{2} - \frac{(l-2a)^2}{4} - \frac{Pl^2}{8}. \quad (8)$$

Підставивши отримане значення C_2 у вирази (2)–(8), отримаємо:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{EI_x} \left(\frac{Px^2}{2} + \frac{P(l-2a)^2}{8} - \frac{Pl^2}{8} \right); \quad (9)$$

$$y = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Px^3}{6} + x \left(\frac{Px^2}{2} + \frac{P(l-2a)^2}{8} - \frac{Pl^2}{8} \right) \right];$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{EI_x} \left(\frac{Px^2}{2} + \frac{P(x-a)^2}{2} + \frac{P(l-2a)^2}{8} - \frac{Pl^2}{8} \right);$$

$$y = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Px^3}{6} - \frac{P(x-a)^2}{6} + x \left(\frac{P(l-2a)^2}{8} - \frac{Pl^2}{8} \right) \right]. \quad (10)$$

Для перевірки отриманих залежностей запишемо поворот перетину як $T_1 = \frac{dy}{dx}$ за умови $x = 0$. З виразу (9) значення T_1 дорівнюватиме:

$$T_1 = -\frac{1}{EI_x} \left(\frac{P(l-2a)^2}{8} - \frac{Pl^2}{8} \right) = -\frac{Pa}{2EI_x} (a-l). \quad (11)$$

Отримана залежність повністю збігається із значенням повороту перерізу, наведеним у довідковій літературі.

Величина початкового вигину f_0 всередині прольоту хребтової балки за умови $x = l/2$ визначатиметься з виразу (10) як:

$$f_0 = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Pl^3}{48} - \frac{P}{6} \left(\frac{l}{2} - a \right)^3 + \frac{l}{2} \left(\frac{P(l-2a)^2}{8} - \frac{Pl^2}{8} \right) \right], \quad (12)$$

і після деяких перетворень отримаємо:

$$f_0 = \frac{Pa}{24EI_x} (3l^2 - 4a^2), \quad (13)$$

де EI_x – згинальна жорсткість двотавра;

I_x – момент інерції перерізу вихідного двотавра.

У праці в [22] було отримано співвідношення між моментами інерції перерізів тавра I_{xt} і двотавра I_x як $I_x = I_{xt}/2$, звідки вираз (13) можна записати як:

$$f_0 = \frac{Pa}{12EI_x} (3l^2 - 4a^2). \quad (14)$$

Після приєднання вихідного двотавра до зетових профілів і зняття прикладеного зусилля балка намагається повернутися в початкове положення, при цьому двотавр згинається моментом $M_0 = P_a$. Унаслідок цього відбувається деяка втрата попереднього напруження в хребтовій балці, а початковий вигин балки зменшується на величину f_p (рис. 4, в).

Диференціальне рівняння вигнутої осі балки можна записати як:

$$d^2y/dx^2 = M_0/(E \cdot I_x);$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI_x} \int M_0 dx = \frac{1}{EI_x} (M_0 x + C); \quad (15)$$

$$y = \frac{1}{EI_x} \int (M_0 x + C) dx = -\frac{1}{EI_x} \left(M_0 \frac{x^2}{2} + Cx + D \right). \quad (16)$$

Граничні умови дорівнюватимуть:

$$x = 0; \quad y = 0; \quad D = 0;$$

$$x = l; \quad y = 0; \quad \frac{M_0 l^2}{2} + Cl.$$

Звідки $C = -\frac{M_0 l^2}{2}$, тоді:

$$T_1 = T_2 = \frac{1}{EI_x} \left(M_0 x - \frac{M_0 x l}{2} \right) = \frac{M_0}{2EI_x} (2x - l). \quad (17)$$

Значення величини f_p , якщо $x = l/2$ дорівнюватиме:

$$f_p = \frac{1}{EI_x} \left(\frac{M_0 x^2}{2} - \frac{M_0 x l}{2} \right) = -\frac{M_0 l^2}{8EI_x} = -\frac{Pal^2}{8EI_x}. \quad (18)$$

Результуючий вигин балки на стадії попереднього напруження (рис. 4, з) дорівнюватиме:

$$f_0 = f_{ot} - f_p = \frac{Pa}{12EI} (3l^2 - 4a^2) - \frac{Pal^2}{8EI_x} = \frac{Pa}{24EI_x} (3l^2 - 8a^2). \quad (18)$$

Втрати величини вигину хребтової балки на стадії виготовлення можуть бути оцінені коефіцієнтом μ , рівним:

$$\mu = \frac{f_0}{f_{ot}} = \frac{Pa}{24EI_x} (3l^2 - 8a^2) / \frac{Pa}{12EI} (3l^2 - 4a^2) = \frac{3l^2 - 8a^2}{6l^2 - 8a^2}.$$

Якщо $a = \frac{1}{3}$, $\mu = 0,345$; якщо $a = \frac{1}{4}$, $\mu = 0,455$.

Під дією зовнішнього навантаження (вважатимемо навантаження рівномірно розподіленим) балка отримує прогин f_q (рис. 5, б), який дорівнюватиме:

$$f_g = \frac{5gl^4}{384EI_x} = \frac{5}{48} \frac{Mgl^2}{EI_x}, \quad (19)$$

де q – рівномірно розподілене погонне навантаження на балку;

M_q – момент зовнішнього навантаження;

EI_x – згинальна жорсткість двотавра;

I_x – момент інерції перерізу попередньо напруженої балки;

E – модуль пружності сталі.

Значення M_0 , M_q та I_x отримані в [22] і можуть бути записані як:

$$M_0 = Pa = 0.1275R_y Ah; \quad (20)$$

$$M_g = Pa = 0.4914R_y Ah; \quad (21)$$

$$I_x = 0.1656Ah^2, \quad (22)$$

де R_y – розрахунковий опір маловуглецевої сталі 09Г2С;

A – площа поперечного перерізу балки;

h – висота перерізу хребтової балки.

Підставивши у вираз (19) значення M_q та I_x , отримаємо:

$$f_g = \frac{5}{48} \frac{0.4914R_y Ah l^2}{0.1656Ah^2 E} = 0.309 \frac{R_y l^2}{Eh}. \quad (23)$$

Підставивши отримане значення для M_0 у вираз (18), отримаємо вираз:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{M_0}{24EI_x} (3l^2 - 8a^2) = \\ &= \frac{0.1275R_y Ah}{0.1656Ah^2 24E} (3l^2 - 8a^2) = \\ &= 0.032 \frac{R_y (3l^2 - 8a^2)}{Eh}. \end{aligned} \quad (24)$$

Сумарний максимальний прогин $f_{\max}$ попередньо напруженої хребтової балки від дії зовнішнього навантаження (рис. 5, в) дорівнюватиме різниці прогину від зовнішнього навантаження і зворотного вигину двотавра балки.

$$\begin{aligned} f_{\max} &= f_g - f_0 = 0.309 \frac{R_y l^2}{Eh} - 0.032 \frac{R_y (3l^2 - 8a^2)}{Eh} = \\ &= \frac{R_y}{Eh} (0.213l^2 + 0.256a^2). \end{aligned} \quad (25)$$

Підставивши в отриманий вираз (10) деякі значення величини a (див. рис. 4, а), отримаємо:

$$\text{за умови } a = \frac{l}{3}$$

$$a_{\max} = 0.309 \frac{R_y}{Eh} \left(0.213l^2 + 0.256 \frac{l^2}{9} \right) = 0.241 \frac{R_y l^2}{Eh}, \quad (26)$$

$$\text{за умови } a = \frac{l}{4}$$

$$f_{\max} = 0.309 \frac{R_y}{Eh} \left(0.213l^2 + 0.256 \frac{l^2}{16} \right) = 0.229 \frac{R_y l^2}{Eh}. \quad (27)$$

Ефективність попереднього напруження за зміни відстані a від опори балки до точки прикладання термічного навантаження P може бути оцінена коефіцієнтом ξ , який визначається відношенням величини прогину від дії зовнішнього навантаження звичайної сталевий балки f_q і величини прогину попередньо напруженої балки $f_{\max}$.

$$\text{Якщо } a = \frac{l}{3}$$

$$\xi = \frac{f_g}{f_{\max}} = \frac{0.309 \frac{R_y I^2}{Eh}}{0.241 \frac{R_y I^2}{Eh}} = 1, 2, 3, \quad (28)$$

якщо $a = \frac{l}{4}$

$$\xi = \frac{f_g}{f_{\max}} = \frac{0.309 \frac{R_y I^2}{Eh}}{0.229 \frac{R_y I^2}{Eh}} = 1. \quad (29)$$

Результати та дискусії. Проведене науково-прикладне дослідження дало змогу отримати низку важливих наукових і прикладних результатів. Насамперед було встановлено кількісні залежності між термічним попереднім навантаженням і зміною напружено-деформованого стану балкових елементів. Ці дані є ключовими для розуміння поведінки матеріалів у складних температурних умовах. З наукового погляду робота розширює існуючі моделі механіки деформованого твердого тіла, інтегруючи аспекти термічної втоми та довговічності.

Практичне значення дослідження полягає у розробці рекомендацій щодо оптимізації конструкції та вибору матеріалів для елементів транспортних засобів, що експлуатуються в умовах значних температурних коливань. Запропоновані підходи надають можливість прогнозувати ресурс роботи балок і підвищити їхню надійність. Це також може сприяти зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню безпеки транспортних систем. Результати дослідження можуть бути використані інженерами-конструкторами для вдосконалення проєктних рішень. Таким чином, отримані дані

мають значний потенціал для впровадження в реальні інженерні практики.

Висновки. Встановлено, що термічне попереднє навантаження суттєво змінює напружено-деформований стан балкових елементів транспортних конструкцій, що потрібно враховувати під час їх проєктування й експлуатації.

За результатами отриманої математичної моделі для визначення попереднього вигину хребтової балки напіввагона можна зробити такі висновки.

1. Зменшення величини початкового вигину на стадії виготовлення балки внаслідок деяких втрат попереднього напруження становить від 14 до 25 %, залежно від місця прикладання термічного навантаження P .

2. Зворотний вигин балки, попередньо напруженої вигином двотавра, знижує величину прогину від дії зварювальних деформацій порівняно з прогином звичайної балки від 23 до 31 %.

Результати дослідження показали, що вплив термічного навантаження може бути як позитивним (збільшення несучої здатності шляхом створення сприятливих залишкових напружень), так і негативним (зниження міцності та жорсткості за несприятливих температурних градієнтів).

Розроблена методика оцінки впливу термічного попереднього навантаження дає змогу прогнозувати зміну працездатності балкових елементів з урахуванням температурних факторів.

Виявлено, що для певних матеріалів та геометрії балок існує оптимальний режим термічного попереднього навантаження, який максимізує їхню несучу здатність та довговічність.

Дослідження підтвердило, що ігнорування термічного попереднього навантаження може

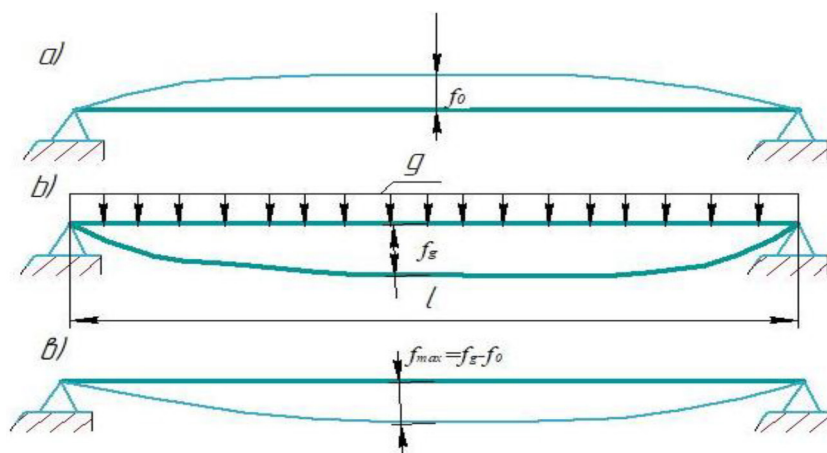


Рис. 5. Прогин попередньо напруженої хребтової балки від дії зовнішнього навантаження: **a** – результуючий зворотний вигин балки на стадії попереднього напруження; **b** – схема завантаження балки і прогин від дії зовнішнього навантаження; **v** – сумарний максимальний прогин попередньо напруженої балки

призвести до недооцінки або переоцінки реальної міцності конструкції, а отже, до некоректного визначення терміну її служби.

Запропоновані практичні рекомендації щодо застосування термічного попереднього навантаження надають можливість підвищити ефективність використання матеріалів та оптимізувати конструктивні рішення.

Встановлено, що величина та характер розподілу залишкових напружень, індукованих термічним навантаженням, прямо впливають на опірність балкових елементів до втоми та крихкого руйнування.

Дані, отримані під час дослідження, можуть бути використані для розробки нових стандартів і норм проєктування транспортних конструкцій з урахуванням температурних впливів.

Доведено необхідність використання комплексних методів розрахунку, що поєднують

температурний, деформаційний та міцнісний аналіз, для точної оцінки роботи балкових елементів.

Результати роботи можуть бути впроваджені в інженерну практику для модернізації та ремонту наявних транспортних об'єктів, що дасть змогу продовжити їхній експлуатаційний ресурс.

Визначено, що ефективність термічного попереднього навантаження залежить від швидкості та інтенсивності нагрівання / охолодження, а також від характеристик матеріалу балки.

Запропоновані підходи до оцінки впливу термічного попереднього навантаження сприятимуть підвищенню безпеки та надійності транспортних конструкцій в умовах змінних температурних режимів.

Дослідження відкриває перспективи для подальших робіт у напрямі розробки адаптивних конструкцій, що реагують на зміни температури, змінюючи свої експлуатаційні характеристики.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Vishal M., Satyanarayanan K. S., Prakash M., Srivastava R., Thirumurugan V. Development and testing of a thermal self-straining preloading test setup for reinforced concrete beams and slabs to perform thermomechanical action. *International Journal of Structural Integrity*. 2024. Vol. 15. No. 6. P. 1079–1099. <https://doi.org/10.1108/IJSI-06-2024-0084>
2. Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P. 79–87. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8
3. Tian L., Zhao H., Wang G., Yuan M., Peng Y., Chen J. Elasticity-Based Locally-Exact Homogenization Theory for Three-Phase Composites Considering the Morphological Effect of Carbon Fibers. *Composite Structures*, 2022. 116428. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116428>
4. Gao D.-y., Gu Z.-q., Wu C. Bending Behavior and Deflection Prediction of High-Strength SFRC Beams under Fatigue Loading. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9 (3). P. 6143–6159. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.017>
5. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2/1 (92). P. 63–71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080
6. El-Zohairy A., Salim H., Shaaban H., Nawar M. T. Fatigue Characteristics of Steel–Concrete Composite Beams. *Infrastructures*. 2024. Vol. 9 (2). P. 29. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9020029>
7. Fomin O., Lovska A., Kulbovskyi I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck, *East European Journal of Advanced Technologies*. 2019. Vol. 2 (7). P. 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
8. Yoshitake I., Tsuda H., Kim Y. J., Hisabe N. Effect of Thermal Distress on Residual Behavior of CFRP-Strengthened Steel Beams Including Periodic Unbonded Zones. *Polymers*. 2015. Vol. 7 (11). P. 2332–2343. <https://doi.org/10.3390/polym7111517>
9. Чухліб В. Л., Губський Р. О., Окунь А. О. Формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при виробництві гнутих профілів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Зб. наук пр. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 2. С. 169–173.
10. Fomin O. V., Burlutskyi O. V., Cherkashin O. P., Rodionov I. V. Study of mathematical models changes in the structure of steel of engineering structures after thermal loading, *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*. 2025. Vol. 41, P. 7–15. DOI: 10.32782/2522-1221-2025-41-01 <http://journals-lute.lviv.ua/index.php/visnyk-tech/article/view/1894>
11. Kuang Y., Wang Y., Xiang P., Tao L., Wang K., Fan F., Yang J. Experimental and Theoretical Study on the Fatigue Crack Propagation in Stud Shear Connectors. *Materials*. 2023. Vol. 16 (2). P. 701. <https://doi.org/10.3390/ma16020701>

12. Fomin O. V., Burlutskiy O. V., Krasulin A. S., Tarasenko A. V., Gunko I. V. Mathematical description of the shrinkage function for determining deformations of mechanical engineering structures. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 36 (75). № 2. 2025. С. 36–41 DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/06>
13. Wang D., Tan B., Xiang S., Wang X. Fatigue Crack Propagation and Life Analysis of Stud Connectors in Steel-Concrete Composite Structures. *Sustainability*. 2022. Vol. 14 (12). 7253. <https://doi.org/10.3390/su14127253>
14. Kala Z. "Sensitivity Analysis of Fatigue Behaviour of Steel Structure under In-Plane Bending", *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*. 2006. Vol. 11 (1). P. 33–45. DOI: 10.15388/NA.2006.11.1.14763
15. Fomin O. V., Burlutskiy O. V., Voronko I., Bursuk O., Kozachuk O. Optimization of the chemical composition of steel for engineering structures by the criterion of stabilization of mechanical properties. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*. 2025. Vol. 15 (1). P. 10–17. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-1>
16. Alam S., Rahman M. A. Fatigue failure analysis of rotating steel beams by classical approach followed by characterization of the fatigue testing machine. *J. Vib. Eng. Technol.* 2025. Vol. 13. P. 194. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-01771-3>
17. Monteiro V. M. d., Cardoso D. C. T., de Andrade Silva F. On the mechanical degradation of R/SFRC beams under flexural fatigue loading. *Mater Struct.* 2024. Vol. 57. P. 87. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02371-5>
18. Alsharari F., El-Zohairy A., Salim H., El-Din El-Sisi A. Pre-damage effect on the residual behavior of externally post-tensioned fatigued steel-concrete composite beams. *Structures*. 2021. Vol. 32. P. 578–587. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.064>
19. Yang J., Wadee M. A., Gardner L. Residual stresses in steel I-section beams strengthened by wire arc additive manufacturing. *Journal of Constructional Steel Research*. 2025. Vol. 232. 109606. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109606>
20. Бурлуцький О. В. Удосконалення технологій виробництва та ремонту вантажних вагонів шляхом наукового обґрунтування термічної правки їх елементів : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів. Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля. Сєвєродонецьк, 2018. 20 с.
21. Фомін О. В., Бурлуцький О. В., Логвіненко О. А. Процедура правки технологічно-деформованих вагонних металокопункцій шляхом створення внутрішнього напруженого стану термічним впливом. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 3. С. 234–238.
22. Беленя Е. І. Попередньо напружені несучі металеві конструкції. *Наукова думка*, 1975. С. 402.

REFERENCES:

1. Vishal, M., Satyanarayanan, K. S., Prakash, M., Srivastava, R., & Thirumurugan, V. (2024). Development and testing of a thermal self-straining preloading test setup for reinforced concrete beams and slabs to perform thermomechanical action [Development and testing of a thermal self-straining preloading test setup for reinforced concrete beams and slabs to perform thermomechanical action]. *International Journal of Structural Integrity*, 15 (6), 1079–1099. <https://doi.org/10.1108/IJSI-06-2024-0084>
2. Sulim, A. O., Fomin, O. V., Khozya, P. O., & Mastepan, A. H. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock [Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock]. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 5 (1), 79–87. <http://dx.doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
3. Tian, L., Zhao, H., Wang, G., Yuan, M., Peng, Y., & Chen, J. (2022). Elasticity-Based Locally-Exact Homogenization Theory for Three-Phase Composites Considering the Morphological Effect of Carbon Fibers [Elasticity-Based Locally-Exact Homogenization Theory for Three-Phase Composites Considering the Morphological Effect of Carbon Fibers]. *Composite Structures*, 116428. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116428>
4. Gao, D.-y., Gu, Z.-q., & Wu, C. (2020). Bending Behavior and Deflection Prediction of High-Strength SFRC Beams under Fatigue Loading [Bending Behavior and Deflection Prediction of High-Strength SFRC Beams under Fatigue Loading]. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (3), 6143–6159. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.017>
5. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovsky, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock [Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock]. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2/1 (92), 63–71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080

6. El-Zohairy, A., Salim, H., Shaaban, H., & Nawar, M.T. (2024). Fatigue Characteristics of Steel – Concrete Composite Beams [Fatigue Characteristics of Steel–Concrete Composite Beams]. *Infrastructures*, 9 (2), 29. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9020029>
7. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., Kharuta, V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck [Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck]. *East European Journal of Advanced Technologies*, 2 (7), 6–12. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
8. Yoshitake, I., Tsuda, H., Kim, Y. J., & Hisabe, N. (2015). Effect of Thermal Distress on Residual Behavior of CFRP-Strengthened Steel Beams Including Periodic Unbonded Zones [Effect of Thermal Distress on Residual Behavior of CFRP-Strengthened Steel Beams Including Periodic Unbonded Zones]. *Polymers*, 7 (11), 2332–2343. <https://doi.org/10.3390/polym7111517>
9. Chukhlib, V. L., Gubskiy, P. O., & Okun, A. O. (2020). Formalised approaches to determining the number of technological transitions in the production of bent profiles [Formalized approaches to determining the number of technological transitions in the production of bent profiles]. *Bulletin of the National Technical University 'KhPI'. Series: Collection of Scientific Papers. Kharkiv: NTU 'KhPI'*, 2, 169–173. <http://dx.doi.org/10.20998/2079-0775.2020.2.16>
10. Fomin, O. V., Burlutskiy, O. V., Cherkashin, O. P., & Rodionov, I. V. (2025). Study of mathematical models changes in the structure of steel of engineering structures after thermal loading [Study of mathematical models changes in the structure of steel of engineering structures after thermal loading]. *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, 41, 7–15. Retrieved from <http://journals-lute.lviv.ua/index.php/visnyk-tech/article/view/1894>
11. Kuang, Y., Wang, Y., Xiang, P., Tao, L., Wang, K., Fan, F., & Yang, J. (2023). Experimental and Theoretical Study on the Fatigue Crack Propagation in Stud Shear Connectors [Experimental and Theoretical Study on the Fatigue Crack Propagation in Stud Shear Connectors]. *Materials*, 16 (2), 701. <https://doi.org/10.3390/ma16020701>
12. Fomin, O. V., Burlutskiy, O. V., Krasulin, A. S., Tarasenko, A. V., & Gunko, I. V. (2025). Mathematical description of the shrinkage function for determining deformations of mechanical engineering structures [Mathematical description of the shrinkage function for determining deformations of mechanical engineering structures]. *Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 36 (75), 2, 36–41. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/06>
13. Wang, D., Tan, B., Xiang, S., & Wang, X. (2022). Fatigue Crack Propagation and Life Analysis of Stud Connectors in Steel-Concrete Composite Structures. [Fatigue Crack Propagation and Life Analysis of Stud Connectors in Steel-Concrete Composite Structures]. *Sustainability*, 14 (12), 7253. <https://doi.org/10.3390/su14127253>
14. Kala, Z. (2006), Sensitivity Analysis of Fatigue Behaviour of Steel Structure under In-Plane Bending, [Sensitivity Analysis of Fatigue Behaviour of Steel Structure under In-Plane Bending]. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 11 (1), 33–45. <http://dx.doi.org/10.15388/na.2006.11.1.14763>
15. Fomin, O. V., Burlutskiy, O. V., Voronko I., Bursuk, O., & Kozachuk, O. (2025) Optimization of the chemical composition of steel for engineering structures by the criterion of stabilization of mechanical properties [Optymizatsiia khimichnoho skladu stali mashynobudivnykh konstruktsii za kryteriiem stabilizatsii mekhanichnykh vlastyvostei]. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 15 (1), 10–17. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-1>
16. Alam, S., & Rahman, M.A. (2025). Fatigue failure analysis of rotating steel beams by classical approach followed by characterization of the fatigue testing machine. [Fatigue failure analysis of rotating steel beams by classical approach followed by characterization of the fatigue testing machine]. *Vibration Engineering & Technologies*, 13, 194. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-01771-3>
17. Monteiro, V. M. d., Cardoso, D. C. T. & de Andrade Silva, F. (2024). On the mechanical degradation of R/SFRC beams under flexural fatigue loading [On the mechanical degradation of R/SFRC beams under flexural fatigue loading]. *Mater Struct*, 57, 87. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02371-5>
18. Alsharari, F., El-Zohairy, A., Salim, H., & El-Din El-Sisi, A. (2021). Pre-damage effect on the residual behavior of externally post-tensioned fatigued steel-concrete composite beams [Pre-damage effect on the residual behavior of externally post-tensioned fatigued steel-concrete composite beams]. *Structures*, 32, 578–587. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.064>
19. Yang, J., Wadee, M. A., & Gardner, L. (2025). Residual stresses in steel I-section beams strengthened by wire arc additive manufacturing [Residual stresses in steel I-section beams strengthened by wire arc

additive manufacturing]. *Journal of Constructional Steel Research*, 232, 109606. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109606>

20. Burlutsky, O. V. (2018). Improvement of freight car manufacturing and repair technologies through scientific justification of thermal straightening of their elements [Improvement of freight car manufacturing and repair technologies through scientific justification of thermal straightening of their elements]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 20 p.

21. Fomin, O. V., Burlutsky, O. V., & Logvinenko, O. A. (2017). Procedure for repairing technologically deformed railway car metal structures by creating internal stress through thermal exposure [Procedure for repairing technologically deformed railway car metal structures by creating internal stress through thermal exposure]. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3, 234–238.

22. Belenia, E. I. (1975). Pre-stressed load-bearing metal structures. *Naukova Dumka*. P. 402.

Стаття надійшла: 07.08.2025

Стаття прийнята: 01.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

