

УДК 69.059

Молодід О. С.¹, д-р техн. наук, проф., <https://orcid.org/0000-0001-8781-6579>Руднєва І. М.¹, канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-9711-042X>Богдан С. М.², <https://orcid.org/0000-0002-1109-3447>¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна² ТОВ «Мареї Україна», м. Київ, Україна**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
ЗОВНІШНІМ АРМУВАННЯМ МЕТОДОМ НАКЛЕЮВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ
КОМПОЗИТНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ (FRP)****Анотація**

Вступ. Методи підсилення, які, переважно, використовуються у вітчизняній практиці для підсилення металевих конструкцій, засновані на додаванні додаткового перетину до металевих елементів шляхом їх кріплення болтами або зварюванням. Ці методи, безумовно, надійні та ефективні, але не завжди можуть застосовуватися, коли необхідно зберегти не тільки будівлю в цілому, але й її первісний внутрішній та зовнішній вигляд. Більш того, металеві елементи збільшують навантаження на конструкцію і будівлю в цілому та схильні до корозії і втоми. Нерідко трапляються випадки, коли зафіксувати елемент підсилення до основної конструкції складно, як з технологічної, так і конструктивної точки зору.

У цих ситуаціях виникає необхідність в підсиленні металевих конструкцій високоміцними матеріалами з низькою масою та високою технологічністю. Серед різних стратегій підсилення конструкцій, наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (FRP — Fibre-reinforced polymer) стає все більш популярним в світі, особливо це стосується залізобетонних конструкцій, хоча застосування до металевих конструкцій теж досить поширене в Європі. Але, слід зазначити, що в Україні, на жаль, цей матеріал наразі немає широкого застосування для підсилення металевих конструкцій.

Проблематика. Відновлення металевих конструкцій стає необхідним щоразу, коли присутні помилки проєктування, виготовлення або виконання будівельних робіт. Також підсилення необхідне у випадках тривалої експлуатації будівель без своєчасного технічного обслуговування та капітальних ремонтів, недостатньої міцності матеріалів конструкцій, а також зміни погодних умов та діючих нормативних документів в Україні. Отже є необхідність в підсиленні металевих конструкцій максимально ефективними методами, як з точки зору надійності будівельних конструкцій, так і з погляду рентабельності, на що впливає тривале припинення роботи підприємств та зупинка виробничого процесу для виконання робіт з реконструкції.

Мета. Дослідити сучасний метод підсилення металевих конструкцій із застосуванням високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (CFRP), з метою збільшення згинальної спроможності металевих конструктивних елементів, зокрема перевірити надійність зчеплення металевої балки з підсилюючим шаром з композитного матеріалу ТМ «Мареї», який наклеєно з використанням клею на епоксидній основі.

Методи дослідження. Експериментальне випробування металевих балок двотаврового перерізу, підсилених зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцного матеріалу на основі вуглецю (CFRP) ТМ «Мареї» шляхом статичного зосередженого навантаження посередині прогону балки.

Результати. Шляхом аналізу результатів виконаного експериментального випробування отримані дані, які свідчать, що після включення в роботу вуглецевого композитного матеріалу

ТМ «Мареї» відсоткове зменшення вертикального прогину при навантаженні 75 кН склало 39,5 %, а величина допустимого навантаження, з врахуванням умови жорсткості (перевірка будівельних конструкцій встановленим умовам граничних прогинів), збільшилася на 11,8%. При проведенні випробування явищ відшарування (деламінації) композиту від основи не виявлено.

Висновки. Підсилення сталевих балок композитним матеріалом на основі вуглецю, призвело до зниження деформацій елемента і, як наслідок, до можливості збільшення несної здатності. Експериментальне випробування підтверджує теоретичні розрахунки щодо можливості збільшити несну здатність металеві балки за допомогою композитних матеріалів ТМ «Мареї». Значний ефект від підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами може бути досягнутий при підсиленні будівельних конструкцій великопрогонових будівель та споруд, які при підсиленні традиційними методами вимагають складних конструктивних рішень, великих витрат праці, зупинки технологічного процесу виробництва для виконання робіт із підсилення, коли вага підсилюючої конструкції часто виявляється значною.

Ключові слова: композитні матеріали, зовнішнє армування методом наклеювання, високоміцні композитні вуглецеві матеріали, реконструкція, підсилення металевих конструкцій, армований волокном полімер, FRP.

Вступ

Відновлення металевих конструкцій стає необхідним щоразу, коли присутні помилки проектування, виготовлення або виконання будівельних робіт. Також підсилення необхідне у випадках тривалої експлуатації будівель без своєчасного технічного обслуговування та капітальних ремонтів, недостатньої міцності матеріалів конструкцій, а також зміни погодних умов та діючих нормативних документів в Україні [10]. Найбільш поширені типи пошкоджень металевих конструкцій пов'язані з характеристиками матеріалів, коли розтягнуті металеві елементи мають зменшення площі поперечного перерізу через корозію, а методи відновлення та модернізації цих конструкцій спрямовані, здебільшого, на збільшення несної здатності конструкцій, або зменшення їх деформативності.

Основна частина

Методи підсилення, які, переважно, використовуються у вітчизняній практиці для підсилення металевих конструкцій, засновані на додаванні додаткового перетину до металевих елементів шляхом їх кріплення болтами або зварюванням. Ці методи, безумовно, надійні та ефективні, але не завжди можуть застосовуватися, коли необхідно зберегти не тільки будівлю в цілому, але й її первісний внутрішній та зовнішній вигляд. Більш того, металеві елементи збільшують навантаження на конструкцію і будівлю в цілому та схильні до корозії і втоми. Нерідко трапляються випадки, коли зафіксувати елемент підсилення до основної конструкції складно, як з технологічної, так і конструктивної точки зору.

У цих ситуаціях виникає необхідність в підсиленні металевих конструкцій високоміцними матеріалами з низькою масою та високою технологічністю. Серед різних стратегій підсилення конструкцій, наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (FRP — Fibre-reinforced polymer) стає все більш популярним в світі, особливо це стосується залізобетонних конструкцій [11, 12, 18–20], хоча застосування до металевих конструкцій [1–5, 11] теж досить поширене в Європі. Але, слід зазначити, що в Україні, на жаль, цей матеріал наразі немає широкого застосування для підсилення металевих конструкцій.

Переваги вищезазначеної технології такі [10]:

- сумісна робота елемента зовнішнього армування з підсилюваною конструкцією, на всіх етапах її навантаження (така робота забезпечується надійним клейовим з'єднанням);
- висока довговічність і стійкість до корозії;
- високі механічні характеристики (міцність і модуль пружності) матеріалів, що складають систему підсилення;
- простота та швидкість монтажу, мінімальне збільшення габаритів, мала власна маса тощо;
- не потрібно влаштування підмостей (роботи можуть виконуватися з автопідйомника)
- не потребують відселення людей, припинення роботи підприємств або зупинки виробничого процесу.

Зростаюча зацікавленість наукової спільноти світу до підсилення зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів підтверджується великою кількістю досліджень та публікацій, рекомендацій та стандартів з відновлення експлуатаційної придатності як залізобетонних [11, 12], так і металевих конструкцій [1–5, 11].

До цілей підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами відносяться:

- збільшення або відновлення межі міцності на розтяг;
- збільшення або відновлення межі міцності на згин;
- підвищення втомної міцності.

Серед різних, спостережуваних дослідниками, режимів відмови особливий інтерес та занепокоєння викликають довговічність, відшарування системи FRP від основної металевої конструкції при експлуатації, а також ефективність підсилення стиснутих елементів.

Саме з вищенаведених причин та з метою дослідження дійсної роботи FRP-матеріалів було виконано дослідження, в якому виконано експериментальне випробування металевих балок двотаврового перерізу, підсилених зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцного матеріалу на основі вуглецю (CFRP) ТМ «Марей», з метою збільшення згинальної спроможності металевого конструктивного елемента, зокрема перевірялась надійність зчеплення металевої балки з підсилюючим шаром з високоміцного матеріалу на основі вуглецю ТМ «Марей», який наклеєний з використанням клею на епоксидній основі, особливо країв стрічки.

Випробування проводили на металевих балках з двотавру №10 (ст. 3пс/сп) — без підсилення, а також двотаврових балках, підсилених зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцного матеріалу на основі вуглецю ТМ «Марей» в зоні розтягу. Балки відрізані від одного прокатного елемента, тому мають однакові механічні властивості, що важливо для подальшого порівняння отриманих результатів для балок без підсилення та з підсиленням зовнішнім армуванням. Установка для випробування з прикладеним навантаженням показана на **рис. 1** та **рис. 2**.

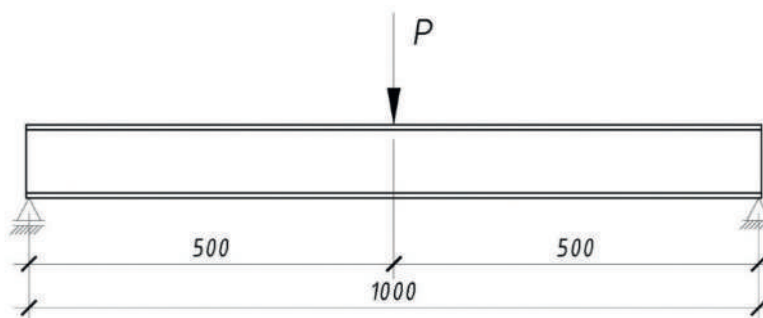


Рисунок 1 — Схема установка для випробування (розміри в мм)



Рисунок 2 — Непідсилена балка в процесі експерименту

Методика проведення експерименту. Підсилення металевих конструкцій включало підготовку основи зони підсилення та нанесення підсилюючих шарів. Підсилення виконують наклеюванням на зону підсилення металевої конструкції високоміцного матеріалу на основі вуглецю ТМ «Марей» в один, два або більше шарів (залежно від того, на скільки потрібно збільшити несну здатність). Основний принцип розміщення композитних елементів підсилення полягає в паралельному їх розташуванні розтягуючим напруженням.

У **табл. 1** наведені технічні характеристики високоміцної фіброармованої тканини Марей MareWrap C UNI-AX 600/10.

Таблиця 1

Технічні характеристики та властивості високоміцної фіброармованої тканини Марей MareWrap C UNI-AX

Властивості матеріалу	Значення
Тип волокна Вид	Високоміцне вуглеволокно Збалансоване однонаправлене волокно
Технічні характеристики	
Вага (г/см ³):	600
Щільність (кг/м ³):	1 800
Еквівалентна товщина сухої тканини (мм):	0,333
Стійкість до навантажень на одиницю товщини (мм ² /м):	333,3
Міцність на розрив (Н/мм ²):	4 830
Максимальне навантаження на одиницю товщини (кН/м):	> 1 600
Модуль пружності на розрив (Н/мм ²):	23 0000
Подовження при розриві (%):	2

Перед приклеюванням вуглецевого волокна поверхню балок підготували, очистивши від корозії за допомогою щітки по металу (**рис. 3**) та знежирили її «розчинником 646» з подальшим просушуванням. Далі наносили ґрунтовку Марей MareWrap Primer 1 та відразу, за методом «мокре на мокре», нанесли на неї клей MareWrap 11. Далі вкладали один шар вуглецевої стрічки MareWrap C UNI-AX 600/10 (товщина одного шару — 0,333 мм), яку завчасно розрізали навпіл по довжині

(ширина — 50 мм). По поверхні укладеної стрічки прокочували поліуретановим валиком до тих пір, доки через неї не проходив клей на зовнішню поверхню. Після цього, на поверхню першої стрічки наносили тонкий шар клею MapeWrap 11 та вкладали на нього другий шар вуглецевої стрічки та повторювали ті ж дії, що й з першим шаром (рис. 4).

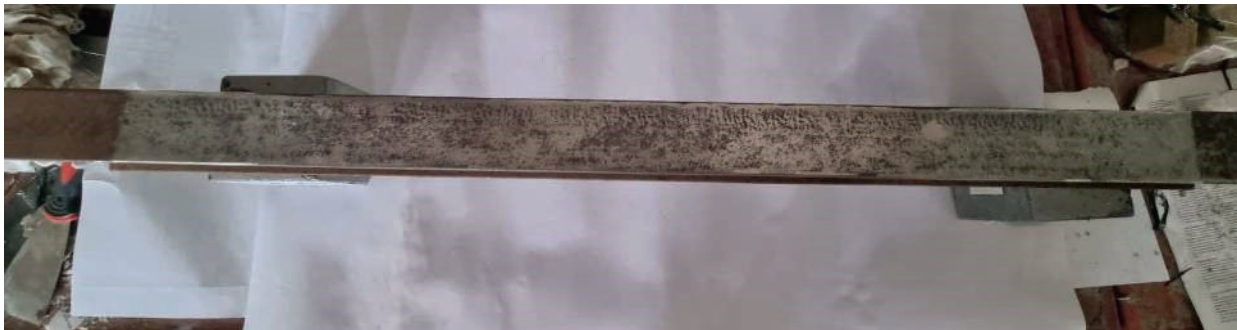


Рисунок 3 — Зачищена балка



Рисунок 4 — Процес нанесення клею MapeWrap 11 та приклеювання вуглецевих стрічок Mapei MapeWrap C UNI-AX 600/10

Як відомо з літератури [5], концентрація напружень знаходиться на краю підсилючої системи, що викликає відшарування композитної стрічки, коли навантаження досягає якийсь критичний поріг. Тому, для зменшення ймовірності відшарування підсилення в адгезивному шарі від нормальних і дотичних напружень поблизу кінцевих частин підсилення вуглецевою стрічкою наклеєно якірні хомути. Їх влаштування виконано за способом, що використаний для основного елемента підсилення (рис. 5).

У ході експерименту проведено випробування:

Балки без підсилення (контрольні) — 3 шт.

Балки з підсиленням зовнішнім армуванням системою ТМ «Мареї» — 3 шт.

Балки навантажувалися зосередженим навантаженням по середині прогону за допомогою преса (максимальне зусилля преса — 50 кН) (рис. 1, рис. 2, рис. 6, рис. 8).



Рисунок 5 — Балка, підсилена зовнішнім армуванням з використанням високоміцних вуглецевих стрічок



Рисунок 6 — Прес (50 кН) для прикладання навантаження при проведенні випробувань



Рисунок 7 — Індикатор годинникового типу, встановлений по середині прогону балки, для вимірювання прогинів

Для вимірювання прогинів по середині прогону балки було встановлено індикатор годинникового типу (**рис. 7**), призначений для вимірювання лінійного переміщення точки конструкції відносно початкового положення, з ціною поділки — 0,01 мм.

Випробування проводилися за температури +26 °С всередині сухого приміщення, тобто в умовах не підвищеної вологості.

Для одержання більш точних експериментальних даних балка завантажувалась ступінчасто з певним кроком, який призначали так, щоб при n кроків сила не перевищувала максимально допустиму. На кожному етапі навантаження знімалися відліки вимірювальних приладів і записувалися в таблицю спостережень (**табл. 2**). Після кожного етапу навантаження витримували

паузи тривалістю 15 хв. Потім бралися відліки за приладами, а далі прикладали навантаження за наступним етапом.

Повне навантаження, до втрати жорсткості, на непідсилену балку склало 7,5 т = 75 кН. Навантаження прикладалося покроково в 8 етапів: 1 — 1 т, 2 — 1 т, 3 — 1 т, 4 — 1 т, 5 — 1 т, 6 — 1 т, 7 — 1 т, 8 — 0,5 т (**рис. 8, рис. 9**).

Повне навантаження на підсилену балку склало 8,5 т = 85 кН. Навантаження прикладалося покроково в 9 етапів: 1 — 1 т, 2 — 1 т, 3 — 1 т, 4 — 1 т, 5 — 1 т, 6 — 1 т, 7 — 1 т, 8 — 1 т, 9 — 0,5 т (**рис. 10, рис. 11**).



Рисунок 8 — Непідсилена двотаврова балка в пресі перед випробуванням



Рисунок 9 — Непідсилена двотаврова балка після випробування



Рисунок 10 — Двотаврова балка, підсилена FRP в пресі перед випробуванням



Рисунок 11 — Двотаврова балка, підсилена FRP в пресі після випробування



Рисунок 12 — Підсилена двотаврова балка після випробування

Максимальне допустиме навантаження на непідсилену балку довжиною 1 м, виконуючи її повний розрахунок за першим та другим граничними станами, складає 76 кН. При проведенні експериментального випробування непідсиленої балки отримали наступне: при навантаженні 75 кН максимальний прогин в середині прогону склав 8,21 мм, який близький до граничного 8,33 мм $\left[\frac{f}{l} \leq \frac{1}{120} = 0,0083 \right]$ [15]. При цьому ж навантаженні в підсиленій балці прогин склав 4,97 мм, що на 39,5 % менше, ніж в непідсиленій.

При навантаженні вагою 80 кН непідсилену балку перевищив допустимий прогин 9,08 мм [15]:

$$\frac{f}{l} = 0,0091 > \left[\frac{f}{l} \leq \frac{1}{120} = 0,0083 \right]. \quad (1)$$

Підсилена балка при навантаженні 8,5 т, зазнала прогин — 8,01 мм, який все ще менше, ніж граничний — 8,33 мм. Тобто, при підсиленні балки композитним матеріалом ТМ «Марей», вдалося збільшити навантаження на 11,8 %, порівняно з непідсиленою, що вочевидь не є межею.

Значення прогинів в середині прогону балки від дії зосередженого навантаження на непідсилену та підсилену балку представлені в **табл. 2**.

Таблиця 2

Установлені прогини при виконанні експериментальних випробувань

Навантаження, кН	Прогин балки, мм		Відхилення $\Delta_f = \frac{ f^H - f^П }{f^П} \cdot 100\%$
	Непідсилена балка f^H	Підсилена балка $f^П$	
0	0	0	
10	0,73	0,72	1,4
20	1,75	1,68	4,0
30	1,98	1,95	1,5
40	2,66	2,59	2,6
50	2,91	3,02	3,8
60	3,76	3,51	6,6
70	4,58	4,00	12,7
75	8,21 ($f_{\text{твор}}^H = 3,95$)	4,97 ($f_{\text{твор}}^П = 3,58$)	39,5 ($\Delta_f^{\text{твор}} = 9,26$)
80	9,08	5,58	38,5
85		8,01	

Висновки

Підсилення сталевих балок зовнішнім армуванням, а саме вуглецевими композитними матеріалами ТМ «Марей», привело до зниження деформацій елемента і, як наслідок, до можливості збільшення несної здатності.

Після включення в роботу вуглецевого композитного матеріалу відсоткове зменшення вертикального прогину при навантаженні 75 кН склало 39,5 %.

У підсиленій балці, з використанням композитного вуглецевого матеріалу, прогин, близький до граничного, виникає при навантаженні 85 кН, що більше навантаження непідсиленої балки на 10 кН.

Експериментальне випробування підтверджує теоретичні розрахунки щодо можливості збільшити несну здатність металеві балки за допомогою композитних матеріалів ТМ «Марей». Отже, величина допустимого навантаження, з урахуванням умови жорсткості (перевірка будівельних конструкцій встановленим умовам граничних прогинів), збільшилася на 11,8 %.

При проведенні випробування явищ відшарування (деламінації) композиту від основи не виявлено. Однак, для того, щоб стверджувати це остаточно, необхідне проведення більш довгострокових експериментальних досліджень, зокрема на інших типах конструкцій, з врахуванням реальних умов міського середовища або моделюванням умов, в яких передбачається використання досліджуваних підсиленіх фіброармованими системами конструкцій.

Для запобігання відшарування поблизу кінцевих частин підсилення FRP слід встановлювати хомути шляхом наклеювання поперек розтягуючих напружень.

Хоча тенденція в зменшенні прогинів підсиленої конструкції спостерігається в теоретичних дослідженнях так само, як і в експериментальних, присутня деяка розбіжність в результатах, що

є результатом не достатньо глибоко проведеного експерименту, де за мету ставилося визначити динаміку поведінки саме підсилених композитним матеріалом металевих конструкцій порівняно з не підсиленими, під навантаженням, та дослідити ймовірність відшарування. Однак, для більш точної оцінки сумісної роботи металу з композитним матеріалом, необхідний більш ґрунтовний й детальніший експеримент.

Значний ефект від підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами може бути досягнутий при підсиленні будівельних конструкцій великопрогонових будівель та споруд, які при підсиленні традиційними методами вимагають складних конструктивних рішень, великих витрат праці, зупинки технологічного процесу виробництва для виконання робіт із підсилення, вага підсилюючої конструкції часто виявляється значною.

Список літератури

1. Luke, S. & Mouchel Consulting. The Use of Carbon Fibre Plates for the Strengthening of Two Metallic Bridges of a Historic Nature in the UK. In I.G. Teng (ed.), FRP Composites in Civil Engineering, Vol. II.
2. Ceriolo, L. & Di Tommaso, A. 2001. Cast Iron Bridge Failure Due to Impact: reduced Vulnerability through FRP Composite Materials Strengthening. In National Conference on Structure failures and reliability of civil constructions; Proc. symp., Istituto Universitario di Architettura di Venezia, 6-7 December 2001.
3. Miller, T.e., Chajes, M.J., Mertz, D.R. & Hastings, J. 2001. Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates, *Journal of bridge engineering*, ASCE, 6(6): from 514-522.
4. Giosuè Boscato. Numerical analysis and experimental tests on dynamic behaviour of gfrp pultruded elements for conservation of the architectural and environmental heritage. PhD. Dissertation. University Iuav of Venice, Venice, Italy, 2009.
5. CNR-DT 202/2005 «Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures». Metallic structures. Preliminary study. ROME –CNR, 2007. 57 p.
6. EN1990 Eurocode 0: Basis of structural design.
7. EN1991 Eurocode 1: Actions on structures.
8. EN 1993 Eurocode 3: Design of steel structures.
9. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. / Мінрегіонбуд України. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2018.
10. І. Руднева, Ю. Прядко, М. Прядко, Г. Тонкачєєв. Особливості та перспективи використання технологій підсилення будівельних конструкцій композиційними матеріалами при реконструкції споруд. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. № 7 (2020), с.12-22. DOI: 10.32347/2522-4182.7.2020.12-22
11. I.N. Rudnieva. Comparative analysis of strengthening of building structures (masonry, metal structures, reinforced concrete) using FRP-materials and traditional methods during reconstruction. «Strength of Materials and Theory of Structures», 2020. № 105 – C.267-291. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.267-291>
12. Kang, T.H.K., Kim, W., Ha, S.S. et al. Hybrid Effects of Carbon-Glass FRP Sheets in Combination with or without Concrete Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 8, 27–41 (2014). <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0061-0>
13. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування/ Мінрегіон України. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2014.

14. ДБН А.1.1-94:2010. Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення. Мінрегіонбуд України. К.: ДП «Укрархбудінформ», 2012.
15. ДСТУ Б В.1.2.-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. /Мінбуд України. – К.: Сталь, 2006.
16. М.В. Прядко, І.М. Руднева, Ю.М. Прядко. Обстеження та підсилення будівельних конструкцій промислових будівель: Навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2018. 332 с.
17. ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. Київ, 2017. – 68 с.
18. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. ЦННИИСК им. Кучеренко. М., 2003.
19. Molodid O. S. Strengthening of reinforced concrete beam structures using external reinforcement. Efficiency research. Organizational and technological model engineering in the construction industry: collective monograph. Lviv-Toruń: Liha-Pres, 2019. P. 69–78.
20. Молодід О. С. Экспериментальные исследования технологии усиления железобетонных колонн углеродными волокнами. *Наука и Техника. Международный научно-технический журнал*. Минск, 2020. Том 19. № 5. С. 395–399.

References

1. Luke, S. & Mouchel Consulting. The Use of Carbon Fibre Plates for the Strengthening of Two Metallic Bridges of a Historic Nature in the UK. In IG. Teng (ed.), FRP Composites in Civil Engineering, Vol. II.
2. Ceriolo, L. & Di Tommaso, A. 2001. Cast Iron Bridge Failure Due to Impact: reduced Vulnerability through FRP Composite Materials Strengthening. In National Conference on Structure failures and reliability of civil constructions; Proc. symp., Istituto Universitario di Architettura di Venezia, 6-7 December 2001.
3. Miller, T.e., Chajes, M.J., Mertz, D.R. & Hastings, J. 2001. Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates, *Journal of bridge engineering*, ASCE, 6(6): from 514-522,
4. Giosuè Boscato. Numerical analysis and experimental tests on dynamic behaviour of gfrp pultruded elements for conservation of the architectural and environmental heritage. PhD. Dissertation. University Iuav of Venice, Venice, Italy, 2009.
5. CNR-DT 202/2005 «Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures». Metallic structures. Preliminary study. ROME –CNR, 2007. 57 p.
6. EN1990 Eurocode 0: Basis of structural design.
7. EN1991 Eurocode 1: Actions on structures.
8. EN 1993 Eurocode 3: Design of steel structures.
9. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні вимоги до забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. /Мінрегіонбуд України. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2018.
10. Rudnieva, Yu. Priadko, M. Priadko, H. Tonkacheiev. Osoblyvosti ta perspektyvy vykorystannia tekhnologii pidslennia budivelnikh konstruktsii kompozytsiinymy materialamy pry rekonstruktsii sporud. Zbirnyk naukovykh prats "BUDIVELNI KONSTRUKTSII. TEORIJA I PRAKTYKA". № 7 (2020), с.12-22. DOI: 10.32347/2522-4182.7.2020.12-22
11. I.N. Rudnieva. Comparative analysis of strengthening of building structures (masonry, metal structures, reinforced concrete) using FRP-materials and traditional methods during reconstruction.

«Strength of Materials and Theory of Structures», 2020. № 105 – С.267-291. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.267-291>.

12. Kang, T.H.K., Kim, W., Ha, S.S. et al. Hybrid Effects of Carbon-Glass FRP Sheets in Combination with or without Concrete Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8, 27–41 (2014). <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0061-0>.

13. DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktсии. Normy proektuvannia/ Minrehion Ukrainy. – K.: DP «Ukrarkhbudininform», 2014.

14. DBN A.1.1-94:2010. Proektuvannia budivelnnykh konstruktсии za Yevrokodamy. Osnovni polozhennia / Minrehionbud Ukrainy. K.: DP «Ukrarkhbudininform», 2012.

15. DSTU B V.1.2.-3:2006. Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia. /Minbud Ukrainy. – K.: Stal, 2006.

16. M.V. Priadko, I.M. Rudnieva, Yu.M. Priadko. Obstezhennia ta pidsylennia budivelnnykh konstruktсии promyslovykh budivel: Navchalnyi posibnyk. – Kyiv: KNUBA, 2018. – 332 p.

17. DSTU B V.3.1-2:2016. Remont i pidsylennia nesuchykh i ohorodzhualnykh budivelnnykh konstruktсии ta osnov budivel i sporud. Kyiv, 2017. – 68 p.

18. Rukovodstvo po usyleniu zhelezobetonnykh konstruktсий kompozytnymy materialamy. TsNNYYSK ym. Kucherenko. M., 2003.

19. Molodid O. S. Strengthening of reinforced concrete beam structures using external reinforcement. Efficiency research. Organizational and technological model engineering in the construction industry: collective monograph. Lviv-Torun: Liha-Pres, 2019. P. 69–78.

20. Molodid O. S. Экспериментальные исследования технологий усиления железобетонных колонн углеводными волокнами. *Наука у Техника. Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnycheskyi zhurnal*. Mynsk, 2020. Tom 19. № 5. P. 395–399.

Oleksandr Molodid¹, D.Sc., Prof., <https://orcid.org/0000-0001-8781-6579>

Iryna Rudnieva¹, Ph.D., Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0002-9711-042X>

Sergey Bogdan², <https://orcid.org/0000-0002-1109-3447>

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

² LLC «Mapei Ukraine», Kyiv, Ukraine

EXPERIMENTAL STUDY OF STRENGTHENING OF METAL STRUCTURES WITH EXTERNAL REINFORCEMENT BY THE METHOD OF GLUING HIGH-STRENGTH CARBON FIBRE-REINFORCED POLYMER (FRP) MATERIALS

Abstract

Introduction. Reinforcement methods, which are mainly used in domestic practice to strengthen metal structures, based on adding an additional section to metal elements by bolting or welding them. These methods, of course, are reliable and effective, but they cannot always be applied when it is necessary to preserve not only the building as a whole, but also its original internal and external appearance. Moreover, metal elements increase the stress on the structure and the building as a whole and are susceptible to corrosion and fatigue. There are often cases when it is difficult to fix a reinforcement element to the main structure, both from a technological and constructive point of view.

In these situations, it becomes necessary to reinforce metal structures with high-strength materials with low weight and high manufacturability. Among the various strategies for reinforcing structures, bonding of high-strength composite carbon materials (FRP — Fiber-reinforced polymer) is becoming more and more popular in the world, especially for reinforced concrete structures, although application to

metal structures is also quite common in Europe. But it should be noted that in Ukraine, unfortunately, this material is not yet widely used to strengthen metal structures.

Problem Statement. The restoration of metal structures becomes necessary every time there are design, manufacturing or construction errors. Strengthening is also necessary in cases of long-term operation of buildings without timely maintenance and major repairs, insufficient strength of structural materials, as well as changes in weather conditions and current regulatory documents in Ukraine. So there is a need to strengthen metal structures with the most effective methods, both from the point of view of the reliability of building structures and from the point of view of profitability, which is influenced by the long shutdown of enterprises and the halt of the production process to carry out reconstruction work.

Purpose. Investigate a modern method of reinforcing metal structures using high-strength carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) materials in order to increase the bending capacity of a metal structural element, in particular, to check the reliability of adhesion of a metal beam to a reinforcing layer of TM «Mapei» composite material, which is glued using epoxy-based glue.

Methods of research. Experimental testing of metal I-beams reinforced with external reinforcement by gluing high-strength carbon-based material (CFRP) TM «Mapei» by means of a static concentrated load in the middle of the beam span.

Results. By analyzing the results of the experimental test, data were obtained indicating that after the inclusion of the carbon fibre-reinforced polymer in the operation, the percentage decrease in vertical deflection at a load of 75 kN was 39.5 %, and the value of the permissible load, taking into account the stiffness condition (checking of building structures the established conditions of limiting deflections), increased by 11.8 %. When testing the phenomena of delamination of the composite from the base was not detected.

Conclusions. Reinforcement of steel beams with a carbon fibre-reinforced polymer material led to a decrease in element deformations and, as a consequence, to the possibility of increasing the bearing capacity. An experimental test confirms the theoretical calculations to maximize the bearing capacity of a metal beam using the fibre-reinforced polymer material. A significant effect from the reinforcement of metal structures with composite materials can be achieved when strengthening the building structures of large-span buildings and structures, when reinforcing by traditional methods, they require complex design solutions, high labor costs, stopping the production process to perform reinforcement work, when the weight of the reinforcing structure is often significant.

Keywords: composite materials, external reinforcement by gluing, high-strength composite carbon materials, reconstruction; strengthening of metal structures, fiber-reinforced polymer.