

Технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції

Ірина Руднєва

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037
irene_r@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-9711-042X>

DOI: 10.32347/2522-4182.8.2021.32-43

Анотація. Будівельна спадщина України включає численні приклади застосування металевих конструкцій, особливо тих, які використовуються в промислових будівлях та у великопробльотних спорудах. Застосування металевих конструкцій в будівництві зумовлене, перш за все, їх механічними властивостями. Вони морозостійкі і витримують температуру до -65 градусів, жорсткі, стійкі, міцні і надійні. Також їх можна використовувати в районах з підвищеною сейсмічною активністю. Але, як і у випадку з іншими типами конструкцій, існує необхідність у відновленні або підсиленні металевих конструкцій внаслідок конструктивних дефектів, зносу несучих елементів, а також з метою збільшення несучої здатності. У певних випадках, підсилення полімерними композитами, армованими волокном (FRP), дає кращий результат, в порівнянні з традиційними методами підсилення з використанням металу.

Значну частину української архітектурної та історичної спадщини складають будівлі і споруди з використанням металевих конструкцій. Вони зіграли фундаментальну роль в розвитку індустріалізації та внесли вагомий вклад в основу теорії споруд й дослідження міцності матеріалів. Перші конструкції були зроблені з чавуну або кованого заліза (обробленого або луженого), але згодом вони швидко розвивалися разом з еволюцією методів ковки мінерального заліза.

Основна культурна причина відновлення старих металевих конструкцій, які гарантують конструктивну функціональність та несучу здатність, заснована не тільки на необхідності збереження їх історичного походження, а й на цінності ландшафту, в яких вони розташовані. Саме з перерахованих вище причин, підсилення



Ірина Руднєва
доцент кафедри
опір матеріалів,
к.т.н., доцент

слід проводити з метою збереження первісної задумки архітектора.

Тривала експлуатація будівель та їх конструктивних елементів з металу без своєчасного технічного обслуговування та капітальних ремонтів, недостатня міцність матеріалів конструкцій, а також зміна погодних умов та діючих нормативних документів в Україні, часто призводить до необхідності перерахунку несучих металевих конструкцій каркасу будівлі та їх підсилення максимально ефективними методами, як з точки зору надійності, так і з погляду рентабельності, на що впливає тривале припинення роботи підприємств, зупинка виробничого процесу або неможливість користуватися прилеглою територією для виконання робіт з реконструкції.

У статті розглядаються технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції споруд, а також приведені основні рекомендації щодо встановлення, моніторингу та технічного обслуговування підсиленних елементів.

Ключові слова. Композитні матеріали; фіброармовані системи; дефекти; пошкодження; реконструкція; підсилення металевих конструкцій; армований волокном полімер FRP; обстеження.

ВСТУП

Будівельна спадщина України включає численні приклади застосування металевих конструкцій, особливо тих, які використовуються в промислових будівлях, мостах та у великопрольотних спорудах. Застосування металевих конструкцій в будівництві зумовлене, перш за все, їх механічними властивостями. Вони морозостійкі і витримують температуру до -65 градусів, жорсткі, стійкі, міцні і надійні. Також їх можна використовувати в районах з підвищеною сейсмічною активністю. Але, як і у випадку з іншими типами конструкцій, існує необхідність у відновленні або підсиленні металевих конструкцій внаслідок конструктивних дефектів, зносу несучих елементів, а також з метою збільшення несучої здатності. У певних випадках, підсилення полімерними композитами, армованими волокном (FRP), дає кращий результат, в порівнянні з традиційними методами підсилення з використанням металу.

Значну частину української архітектурної та історичної спадщини складають будівлі і споруди з використанням металевих конструкцій. Вони зіграли фундаментальну роль в розвитку індустріалізації та внесли вагомий вклад в основу теорії споруд й дослідження міцності матеріалів. Перші конструкції були зроблені з чавуну або кованого заліза (обробленого або лудженого), але згодом вони швидко розвивалися разом з еволюцією методів ковки мінерального заліза.

Основна культурна причина відновлення старих металевих конструкцій, які гарантують конструктивну функціональність та несучу здатність, заснована не тільки на необхідності збереження їх історичного походження, а й на цінності ландшафту, в яких вони розташовані. Саме з перерахованих вище причин, підсилення слід проводити з метою збереження первісної задумки архітектора.

Дуже важливим питанням є також збереження первозданної атмосфери та цілісності пам'яток архітектури, що мають переважно архітектурне та культурне значення,

для використання майбутніми поколіннями, а також реконструкція застарілих громадських, промислових і призначених для потреб сільського господарства будівель і споруд, продовження тривалості їх експлуатації, зокрема у разі зміни функціонального призначення будівлі чи споруди для створення об'єкту нерухомості непромислового призначення.

ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ.

Тривала експлуатація будівель, зокрема їх конструктивних елементів без своєчасного технічного обслуговування та капітальних ремонтів, недостатня міцність матеріалів конструкцій, а також зміна погодних умов та діючих нормативних документів в Україні, часто призводить до необхідності перерахунку несучих металевих конструкцій будівлі та їх підсилення 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 РОБОТИ

Вивчення технологічних особливостей підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами при реконструкції споруд, з метою зменшення ваги, матеріалоємності, збереження зовнішнього вигляду після реконструкції, а також врахуючи вплив такого методу підсилення на всіх стейкхолдерів та беручи до уваги економічні фактори.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Найбільш поширений тип пошкоджень металевих конструкцій пов'язаний з характеристиками матеріалів. Наприклад:

- Пошкодження чавуну найчастіше відбувається при ударі через його крихкість, а утворення тріщин внаслідок впливу змін температури, що викликає розтягучі напруження.

- Розтягнуті елементи з кованого заліза часто мають зменшення площі поперечного перерізу через корозію.

Мости, побудовані у другій половині XIX століття – початку XX століття, є одними з найстаріших і найпоширеніших металевих конструкцій, зокрема, в даний час все ще використовуються й залізничні мости. Відсутність належного обслуговування, корозія, а також втома є основними причинами їх руйнування або неприпустимих деформацій. Збільшення інтенсивності руху часто вимагає підсилення існуючих мостових конструкцій.

Традиційні методи підсилення, що зараз використовуються для відновлення або збільшення несучої здатності металевих конструкцій, засновані на застосуванні сталевих елементів шляхом кріплення болтами або зварювання, безумовно, дуже актуальні та ефективні, але не завжди можуть застосовуватися в разі підсилення несучих конструкцій історичних будівель, коли необхідно зберегти не тільки будівлю в цілому, але і зовнішній архітектурний вигляд споруди. Отже, у цих методів є кілька недоліків. Сталеві елементи збільшують навантаження на конструкцію і схильні до корозії і втоми. Часто буває важко приварити підсилюючу конструкцію до основної конструкції, наприклад, до чавунної. Підсилення існуючих металевих конструкцій, що зазнають транспортного навантаження, слід підсилювати більш легкими методами, такими, як застосування FRP-матеріалів. Це різко скорочує перебої в дорожньому русі.

Отже, витрати, пов'язані з підсиленням існуючої споруди зовнішнім армуванням композитними FRP-матеріалами (Fibre-reinforced polymer), часто менше, ніж ті, які необхідні для демонтажу або реконструкції споруди традиційними способами. І це не тільки з економічної, але й з соціальної, точки зору.

Використання FRP-матеріалів долає деякі труднощі, пов'язані з використанням традиційних методів і матеріалів для підсилення. FRP-матеріали мають підвищене співвідношення міцності до ваги, набагато більше, ніж сталь. Вони набагато більш

стійкі до корозії, практично не схильні до її впливу, а також надзвичайно прості у використанні.

Використання таких матеріалів для підсилення металевих конструкцій не так розвинене, як для бетону або цегляної і кам'яної кладки. Дослідження в світі зараз зосереджені тільки на деяких можливостях, зокрема:

- підсилення клепаних елементів від поширення втомних тріщин;

- підсилення розтягнутих елементів або розтягнутої зони згинальних елементів для зниження напружень в умовах експлуатації через збільшення навантажень або внаслідок корозії. Попереднє напруження пластини з FRP-матеріалу перед приклеюванням знижує розтягувальні напруження при експлуатації, не потребуючи попереднє застосування тимчасових розпірок з попереднім натягненням для підтримки згинальних елементів.

Використання FRP зручно також для підсилення старих металевих конструкцій, оскільки механічні властивості FRP добре співвідносяться з властивостями чавуну. Висока міцність на розрив FRP в напрямку волокон, а також використання техніки попереднього напруження компенсують низьку межу міцності чавуну.

FRP можна наносити на сталеві конструкції або шляхом приклеювання листів з композиту за допомогою термореактивної смоли або, це можуть бути пултрузійні ламіни, наприкінці, попередньо напружені. Особливу увагу слід приділити ефективності техніки склеювання.

Що стосується вибору волокна, то вуглецеве найчастіше є найбільш придатним через те, що воно має вище значення модуля пружності Юнга, ніж у сталі. Що не може бути сказано ні про скловолокна, ні про арамідні волокна.

Застосування FRP для підсилення металевих конструкцій.

В Європі та Америці несуча здатність деяких історичних мостів була відновлена саме завдяки застосуванню FRP. Нажаль, в Україні таких прикладів не відомо. Технології, які застосовуються для з'єднання

композитних фіброармованих систем з розтягнутою зоною елементів конструкції, різні. Це може бути мокре укладання, попереднє напруження або приклеювання пултрузійних пластин. Прикладами є міст Хайт в Англії [1], пішохідний чавунний арочний міст Корона в Італії [2], який був підсилений при застосуванні полімерних матеріалів, армованих арамідними волокнами. У США міст Крістіні Крік 1-704 підсилений плитами CFRP [3].

Однопрольотний транспортний міст Слаттокса, побудований в 1936 році через канал Рочдейл (Великобританія), прольотом 7,6 м, підтримується дванадцятьма двотавровими балками, кожна з яких підсилена пластинами з вуглецевого волокна CFRP товщиною 4 мм в два шари, загальна глибина армування 8 мм, і шириною 100 мм, які приклеєні до розтягнутої зони нижнього поясу існуючих балок (Рис.1). Це збільшило несучу здатність мосту зі 170 кН до 400 кН [5, 14]. Застосування FRP дозволило заощадити близько 40%, порівняно з традиційним методом підсилення з використанням металу, який вимагав встановлення світлофорів для контролю потоку транспортних засобів.

Тікфордський міст в Великобританії - це чавунна арочна конструкція, побудована Т.Вілсоном в 1810 році (Рис.2). Це елегантна конструкція, що складається з шести паралельних чавунних ребер з прольотом 18 м. Його функціональне призначення передбачає проїжджу частину дороги. Певні комбінації навантаження і температури викликали розтягуючі напруження в нижній частині ребер арки. Смуги з вуглецевого волокна були приклеєні з використанням технології «wet-lay-up» (мокрого укладання), до нижньої сторони поздовжніх елементів і в кільцях перемички шарами, достатніми для досягнення необхідної міцності на розрив. Щоб уникнути явища гальванічної корозії, між чавуном і вуглецем був застосований шар з волокон поліестеру [5, 14]. Всього було нанесено 14 шарів, що досягають товщини 10 мм. Реставрація була завершена нанесенням фарби того ж кольору, що і міст, що зробило це втручання невидимим.



Рис.1. Підсилення існуючих балок двома пластинами з вуглецевого волокна. Транспортний міст Слаттокса, Англія.
Fig.1. Strengthening of existing beams by two CFRP-plates. Slattocks Canal Bridge, England.



Рис.2. Тікфордський чавунний арочний міст в Великобританії.
Fig.2. Tickford cast iron arch bridge in Great Britain..

Пішохідний міст «Палудо» в Венеції (кінець XIX століття) довжиною - 12,7 метра виконаний повністю із заліза і дерева (Рис.3). Після обстеження [4] було виявлено, що підсилення і глобальна реставрація необхідні через серйозний знос, агресивні умови навколишнього середовища були основною причиною місцевої іржі і зниження механічних характеристик дерев'яних балок. Після загального відновлення залізної конструкції була покращена жорсткість настилу на згин шляхом заміни поздовжніх дерев'яних балок пултрузійними профілями зі склопластику GFRP

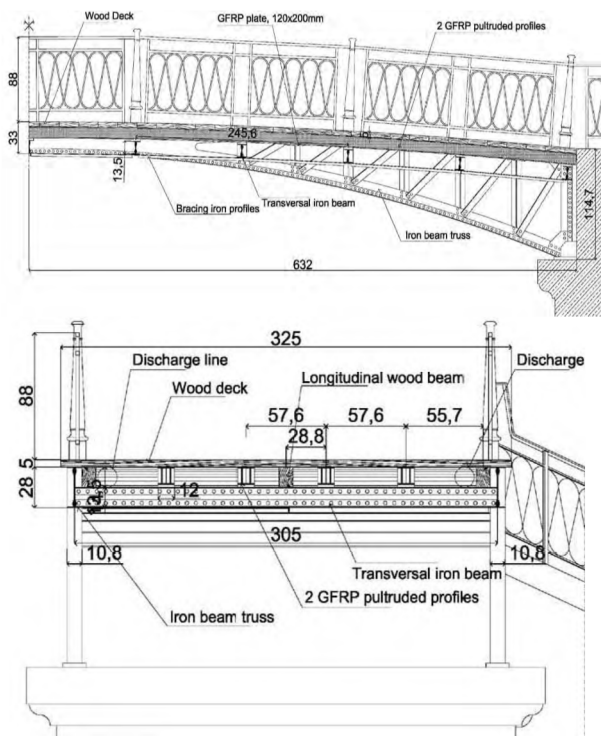


Рис.3. Пішохідний міст «Палудо» в Венеції.
Fig.3. Pedestrian Bridge “Paludo” in Venice.

Цей пішохідний міст є важливою сполучною ланкою між школою і житловими будинками; для заміни всіх поздовжніх дерев'яних балок, міст простояв лише добу. Це було можливо через невелику власну вагу композитного матеріалу FRP, що зробило

простішим транспортування, складання та встановлення.

Спосіб підсилення металевих конструкцій включає підготовку основи зони підсилення та нанесення підсилюючих шарів. Підсилення виконують нанесенням на зону підсилення металевої конструкції високоміцних фіброармованих систем (ФАС) в один, два або більше шарів (в залежності від того, на скільки потрібно збільшити несучу здатність) на епоксидно-клеї.

Основні вимоги до підсилення.

1. 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;
 - останні дослідження також виявили можливість збільшення або відновлення несучої здатності тонких стиснутих елементів [14-19]. Проте, кількості як теоретичних, так і експериментальних досліджень, все ще замало, щоб визначити надійну процедуру проектування.
2. Для підсилення металевих елементів застосовують, переважно, пултрузійний ламінати або просочені до зовнішньої поверхні конструктивних елементів композитні листи.
3. Розрахунок підсилення повинен бути спрямований на забезпечення напруженого стану при розтягуванні в межах підсилюваної зони з використанням FRP. Використання FRP в зоні стиску в даний час не рекомендується через відсутність адекватних моделей і досліджень на явища відшарування композиту від основи, при наявності стискаючих напружень.
4. Схильні до циклічних навантажень, в тому числі від теплових навантажень, системи підсилення металевих конструкцій із застосуванням FRP, можуть з часом бути зруйнованими. Щоб зменшити цей-потенційний режим відмови, в підсиленій

зоні рекомендується застосовувати додаткові механічні з'єднувачі.

5. FRP-підсилення слід обирати таким чином, щоб воно було сумісним з умовами навколишнього середовища (температура, вологість, УФ-випромінювання тощо), яких воно буде зазнавати, уникаючи утворення гальванічних струмів.
6. У разі FRP-підсилення чутливих до втоми елементів, а також при використанні техніки попереднього напруження слід враховувати явище повзучості клею, та застосовувати додаткові механічні з'єднувачі.
7. Якщо металевий елемент знаходиться в стані корозії, вона повинна бути повністю вилучена, особливу увагу потрібно приділити відновленню початкового профілю.
8. FRP-підсилення існуючих металевих конструкцій може бути виконано тільки у випадку, коли вихідна конструкція відповідає вимогам граничних станів (ULS) з врахуванням квазікомбінації постійних навантажень (як визначено в нормах проектування) з використанням частних коефіцієнтів надійності для надзвичайних умов навантаження [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].
9. Підсилені металеві конструкції вимагають огляду і моніторингу [5]:
I - під час і відразу після встановлення системи підсилення;
II - протягом терміну служби через регулярні проміжки часу, оскільки немає надійної інформації про довгострокову поведінку систем підсилення FRP.
10. Композитні матеріали не потребують спеціальних заходів з технічного обслуговування. Якщо шар поверхні смоли втрачено внаслідок стирання або погіршення стану навколишнього середовища, його можна замінити за допомогою сумісної смоли.
11. Існуюча металева конструкція повинна бути піддана звичайному огляду та технічному обслуговуванню. Зокрема, рекомендується поновлювати фарбу до її виходу з ладу, щоб уникнути піскоструминної обробки конструкції, що вимагатиме належного захисту FRP.

12. Персонал, який відповідає за випробування напівдеструктивного та неруйнівного контролю, повинен мати один із трьох кваліфікаційних рівнів, згідно з UNI EN 473 [25] та UNI EN 45013 [26]. Слід зазначити, що в Україні це зараз не регламентується.

Основні рекомендації щодо встановлення зовнішнього армування фіброармованими системами.

1. Правильна установка систем підсилення FRP залежить від наступних факторів: зберігання матеріалів, підготовка субстрату, підготовка підсилювальних матеріалів, умови навколишнього середовища (температура, вологість), управління робочим місцем (чистота, заходи захисту від випадкових подій).
2. Підсилюючі матеріали (волокна, смоли, композити) повинні зберігатися в умовах, вказаних виробником.
3. При підготовці підсилювальної системи треба суворо дотримуватися інформації, наданої виробником. Наприклад, клейкі смоли часто отримують сумішшю двох частин, чие кількісне співвідношення повинно суворо відповідати вимогам, наданим виробником.
4. Добра адгезія «FRP – металевих елементів» залежить від умов температури та вологості.
5. Зокрема, температура як конструкції, так і середовища впливає на необхідний час для розвитку заданого відсотка кінцевої міцності в клейовому з'єднанні. Виробники дають інформацію про діапазони температур, при яких хімічні реакції розвиваються правильно, що необхідно для досягнення міцності клейового з'єднання.
6. Надмірна вологість може негативно вплинути на кінцеву міцність клейового з'єднання та його довговічність.
7. Клейове з'єднання повинно бути захищене від контакту з водою, протягом часу, потрібного для набору міцності.
8. Для доброї якості підсилювальної системи слід приділяти увагу очищенню по

верхні основи, уникати присутності частинок, які негативно впливають на якість з'єднання «FRP – основа».

Підготовка поверхні основи. Правильна підготовка поверхонь є важливою для гарного адгезійного зв'язку композитної системи FRP з металевою основою. Підготовка передбачає обробку поверхні основи, з виконанням наступних кроків:

- Зняти покриття (наприклад, фарбування), шлак та інші продукти корозії, за допомогою металевої щітки або струминного очищення. В разі крихких елементів (наприклад, чавун) потрібна особлива обережність, уникати ударів та використання перфораторів.
- Знежирити розчинником, адаптованим для видалення жиру і запобігання великої площі забруднення склеюваних поверхонь.
- Шліфування. Можна використовувати суху або вологу піскоструминну очистку, щоб оголити хімічно активну поверхню перед склеюванням. Сміття слід видаляти тільки водою.
- Сушка поверхні. Якщо поверхня намокла в кінці абразивної обробки і фази очищення, то її слід просушити, щоб уникнути швидкого утворення оксидних шарів на відкритій поверхні.
- Хімічне травлення. У разі утворення оксидних шарів, у випадку оцинкованої або нержавіючої сталі, необхідне травлення кислотою й подальша нейтралізація продуктів травлення. Для чавуна це не потрібно.
- Ґрунтовка. Перший шар клеючої смоли слід нанести якомога швидше, протягом двох годин, після очищення поверхні основи. У деяких випадках використання Ґрунтовки потрібно, щоб зробити існуючу металеву поверхню сумісною з матеріалом ФАС.
- Заповнити нерівності Ґрунтовкою, а потім смолою.
- Для зменшення нормальних і дотичних напружень відшаровування в адгезивному шарі поблизу кінцевих частин підсилення ФАС слід встановити механічні

з'єднувачі поблизу кінцевих частин підсилення ФАС на ділянці не менше 200 мм Рис.4 (а). Якщо механічні з'єднувачі неможливо встановити по причині того, що надана довжина анкерного кріплення є недостатньою, слід зменшити товщину пластини поблизу кінцевих частин підсилення ФАС на ділянці не менше 200 мм Рис.4 (b, c).

- При використанні вуглецевих волокон, прямий контакт з металевою поверхнею можна уникнути за допомогою вставки шару з ізоляційного матеріалу з склопластику GFRP, щоб уникнути гальванічної корозії.
- В разі підсилення балки, яка працює на згин, коли є клепані чи болтові з'єднання, рішення слід приймати згідно рис. 5.

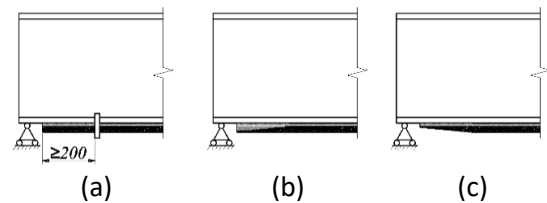


Рис.4. Типова деталізація крайніх ділянок FRP-системи підсилення, що дозволяє зменшити напруження відшаровування.

Fig.4. Typical end detailing of the FRP strengthening system, allowing for a reduction of the debonding stresses.

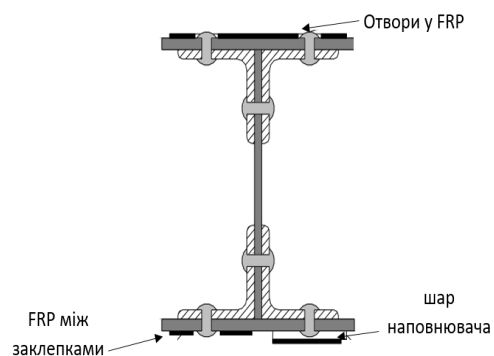


Рис.5. Підсилення балки, яка працює на згин, при наявності заклепок або болтів.

Fig.5. Flexural strengthening of a riveted or bolted beam.

Контроль якості при встановленні

- Контроль якості під час встановлення системи підсилення FRP може виконувати

тись напівруйнівними або неруйнівними методами контролю.

- Якщо використовується підсилення з попередньо затверділого ФАС, кваліфікаційні випробування композитних матеріалів повинні вже бути виконані виробником. У разі систем підсилення ФАС, затверділих на місці, необхідні лабораторні дослідження. У будь-якому випадку слід підготувати зразки для оцінки міцності проти розшарування.
- Для проведення полудеструктивних випробувань додаткові спеціальні випробувальні зони підсилені FRP повинні бути підготовлені. Загальна площа зон повинна бути не менше 0,5% від реально підсиленою площі. Зони тестування повинні бути розділені на прямокутні ділянки розміром 500 мм x 200 мм. Система підсилення FRP повинна застосовуватися в цих спеціальних випробувальних зонах з використанням тих же матеріалів і процедур, піддаватися тим же впливам навколишнього середовища, що і сама системи підсилення.

Напівруйнівні випробування

- Напівруйнівні випробування потрібно проводити на «тестових» зонах і в некритичних підсиленних місцях з розрахунку одна проба на кожні 5 м² підсиленої площі, але в будь-якому випадку не менше 2 для кожного типу тесту.
- Випробування на відрив. Тест підходить для оцінки підготовки поверхні основи і перевірки сумісності обраного клею з основою з металу. Здійснюється за допомогою круглої сталевий пластини товщиною 20 мм і діаметром не менше 40 мм. Елемент підсилення з FRP ріжеться корончатим свердлом зі швидкістю не менше 2500 об / хв. Особливу увагу слід приділити тому, щоб уникнути нагріву системи FRP.
- Випробування на розрив при зсуві. Тест особливо підходить для перевірки якості з'єднання між FRP і металевим елементом. Це може бути виконано тільки тоді, коли є можливість витягнути частину FRP-системи в площині, розташованій поблизу відірваного краю.

- Випробування на розрив при крученні проводиться за допомогою спеціального пристрою, який може створити крутний момент.

Неруйнівний контроль

- Існують різні типи неруйнівних випробувань, спрямованих на виявлення різних типів дефектів та для визначення однорідності прилягання FRP (див. Таблицю 1) [5]. Зокрема, для виявлення порожнеч у клейовому шарі. Але, на жаль, не існує такого типу неруйнівного тесту, який може ідентифікувати слабкий зв'язок, який виникає через іржу або жир на металевій поверхні.
- Високочастотний ультразвуковий контроль. Дефекти з'єднання, локальне розшарування або наявність пустот в адгезивному шарі можуть бути ідентифіковані за допомогою ультразвукових випробувань, оскільки вони впливають на час проходження ультразвукових хвиль. Для цього необхідне спеціальне обладнання і персонал.
- Стимульоване акустичне випробування Використовуються імпульси низької частоти.
- Акустико-емісійні випробування дозволять оцінити пошкодження всередині навантаженої конструкції, шляхом прослуховування і реєстрації шуму, спричиненого утворенням тріщин або розшаруванням, яке поширюється, як пружні хвилі. Це випробування застосовується до пасивних систем, які активуються, якщо виникають аномальні умови, та особливо підходить для виявлення дефектів при застосуванні FRP-матеріалів, а також при наявності відшарування від основи.

ВИСНОВКИ

1. Основними цілями підсилення металевих конструкцій фіброармованими полімерами є збільшення або відновлення міцності на розтяг, збільшення або відновлення міцності на згин, підвищення втомної міцності

2. Виконано огляд технологічних особливостей і актуальних проблем в області підсилення металевих конструкцій ком-

позитними матеріалами, а також зачеплена історична перспектива цього методу реновації.

Табл. 1. Мінімальні допуски по товщині дефекту які слід визначати неруйнівними методами контролю.

Table 1. Minimum resolution for defects thickness to be identified with non destructive tests.

Наявність напружень зсуву в зоні стику	Приклад	Неруйнівний контроль	Мінімальні допуски по товщині дефекту
Відсутня	Обгортання, за винятком області перекриття в одношаровому застосуванні	Необов'язковий	3,0 мм
Слабка	Центральна частина дуже великої площі підсилення	Необов'язковий	3,0 мм
Помірна	Центральна зона, підсилена на згин в по-вздожньому напрямку	Бажаний	0,5 мм
Критична	Зони анкерування, зони перекриття між шарами, підсилення на зсув, області сполучення зі з'єднувачами, ділянки з великою шорсткістю або тріщинами в металевому елементі	Необхідний	0,1 мм

3. У статті розглянуті проблеми методу підсилення конструкцій з використанням композитних матеріалів.

4. В Україні відсутня нормативно-дослідна база, присвячена проблемі підсилення металевих будівельних конструкцій композитними матеріалами, тому є можливість використовувати виключно зарубіжний досвід і рекомендації при проектуванні такого роду підсилень.

5. Основний принцип розміщення композитних елементів підсилення полягає в паралельному розташуванні розтягуючим напруженням.

6. Незважаючи на великий обсяг інформації про ФАС в світі, питання надійності методу підсилення, саме металевих конструкцій композитними матеріалами, ще належить належним чином вивчити.

7. Крім того, в загальному обсязі повинні виконуватися вимоги до довговічності, технологічності, економічної ефективності, екологічних і соціальних факторів.

8. Значний ефект від підсилення металевих конструкцій композитними матеріалами може бути досягнутий при підсиленні балок покриття промислових будівель або великопрольотних конструкцій, 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.

9. Застосування композитних матеріалів для підсилення металевих конструкцій вимагає лише встановлення легких підмостей (можлива робота з автопідйомників), що не займає багато часу.

ЛІТЕРАТУРА

10. **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.*
11. **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.*
12. **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,*

13. **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.*
14. **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.*
15. **EN1990 Eurocode 0:** Basis of structural design.
16. **EN1991 Eurocode 1:** Actions on structures.
17. **EN 1993 Eurocode 3:** Design of steel structures.
18. **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.*
19. **ДБН В.1.2-2:2006.** Навантаження і впливи. Норми проектування / *Мінбудархітектури України. – К.: Сталь, 2006.*
20. **ДБН В.2.6-198:2014.** Сталеві конструкції. Норми проектування / *Мінрегіон України. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2014.*
21. **ДБН А.1.1-94:2010.** Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення / *Мінрегіонбуд України. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2012.*
22. **ДСТУ Б В.1.2.-3:2006.** Прогини і переміщення. Вимоги проектування. / *Мінбуд України. – К.: Сталь, 2006.*
23. **V. Zerbo, A. Di Tommaso & L. Ceriolo.** FRP strengthening systems for metallic structures: a state of the art. *Structural Analysis of Historical Constructions - Modena, Lourenço & Roca (eds), 2005. Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 15363799*
<http://www.hms.civil.uminho.pt/sahc/2004/891.pdf>
24. **Руднева І.Н., Прядко Ю.Н.** Сравнительный анализ Еврокодов и национальных стандартов Украины, в том числе частных коэффициентов надежности и учета фактора времени, при проектировании конструкций. *Науково-виробничий журнал «Промислове будівництво та інженерні споруди», №1, 2020, стр.39-45.*
http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pbis_2020_1_10
25. **М.В. Прядко, І.М. Руднева, Ю.М. Прядко.** Обстеження та підсилення будівельних конструкцій промислових будівель: *Навчальний посібник. – Київ: КНУБА, 2018. – 332 с.*
26. **І. Руднева, Ю. Прядко, М. Прядко, Г. Тонкачєв.** Особливості та перспективи використання технологій підсилення будівельних конструкцій композиційними матеріалами при реконструкції споруд. *Збірник наукових праць "Будівельні конструкції. Теорія і практика". № 7 (2020), с.12-22.*
<http://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.12-22>
27. **І. Руднева, Ю. Прядко, М. Прядко.** Аналіз причин обвалення покрівель виробничих будівель. *Збірник наукових праць "Будівельні конструкції. Теорія і практика". № 6 (2020), с.85-93.*
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.85-93>
28. **Lanier, В.К.** Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism. *M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2005.*
29. **Cadei, J.M.C., Stratford T.J., Hollaway L.C., Duckett W.G.** Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers, *Report CIRIA C595. London: CIRIA. 2004.*
30. **Miller, T. C., Chajes, M. J., Mertz, D. R. and Hastyings, J.** Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates, *Journal of bridge engineering, ASCE, 2001. 6(6): p. 514-522.*
31. **ДСТУ Б В.3.1-2:2016.** Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. *Київ, 2017. – 68с.*
32. *Пособие по обследованию строительных конструкций зданий. АО ЦНИИПромзданий. – М.: 1997.- 141с.*
33. **ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016** Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. – *Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 44 с.*
34. **UNI EN 473:2008-11.** Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel - General principles
35. **UNI CEI EN 45013:1990.** General criteria for certification bodies operating certification of personnel.
36. **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>

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 Conf 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. P 215*.
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. **DBN V.1.2-14:2018.** Zahalni pryntsyropy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyv-noi bezpeky budivel, sporud, budivelnnykh konstruktsii ta osnov. / *Minrehionbud Ukrainy. – K.: DP «Ukrarkhbudininform», 2018.*
10. **DBN V.1.2-2:2006.** Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia / *Minbudarkhitektury Ukrainy. – K.: Stal, 2006.*
11. **DBN V.2.6-198:2014.** Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia/ *Minrehion Ukrainy. – K.: DP «Ukrarkhbudininform», 2014.*
12. **DBN A.1.1-94:2010.** Proektuvannia budivelnnykh konstruktsii za Yevrokodamy. *Osnovni polozhennia / Minrehionbud Ukrainy. – K.: DP «Ukrarkhbudininform», 2012.*
13. **DSTU B V.1.2.-3:2006.** Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia. / *Minbud Ukrainy. – K.: Stal, 2006.*
14. **V. Zerbo, A. Di Tommaso & L. Ceriolo.** FRP strengthening systems for metallic structures: a state of the art. *Structural Analysis of Historical Constructions - Modena, Lourenço & Roca (eds), 2005. Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 15363799.*
<http://www.hms.civil.uminho.pt/sahc/2004/891.pdf>
15. **Rudneva Y.N., Priadko Yu.N.** Sravnytelnyy analiz Evrokodov y natsyonalnykh standartov Ukrainy, v tom chysle chastykh koefitsyentov nadezhnosti y ucheta faktora vremeni, pry proektyrovannyi konstruktsii. *Naukovo-vyrobnychiy zhurnal «Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy», №1, 2020, str.39-45.*
http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pbis_2020_1_10
16. **M.V. Priadko, I.M. Rudnieva, Yu.M. Priadko.** Obstezhennia ta pidsylennia budivelnnykh konstruktsii promyslovykh budivel: *Navchalnyi posibnyk. – Kyiv: KNUBA, 2018. – 332 s.*
17. **I. Rudnieva, Yu. Priadko, M. Priadko, H. Tonkacheiev.** Osoblyvosti ta perspektyvy vykorystannia tekhnolohii pidsylennia budivelnnykh konstruktsii kompozytsiinomy materialamy pry rekonstruktsii sporud. *Zbirnyk naukovykh prats "Bydivelni konstruktsii. Teoriia i prikyta". № 7 (2020), c.12-22.*
<http://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.12-22>
18. **I. Rudnieva, Yu. Priadko, M. Priadko.** Analiz prychn obvalennia pokrivel vyrobnychykh budivel. *Zbirnyk naukovykh prats "Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka". № 6 (2020), c.85-93.*
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.85-93>
19. **Lanier, B.K.** Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism. *M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2005.*
20. **Cadei, J.M.C., Stratford T.J., Hollaway L.C., Duckett W.G.** Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers, *Report CIRIA C595. London: CIRIA. 2004.*
21. **Miller, T. C., Chajes, M. J., Mertz, D. R. and**

- Hastings, J.** Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates, *Journal of bridge engineering, ASCE*, 2001. 6(6): p. 514-522.
22. **DSTU B V.3.1-2:2016.** Remont i pidsylennia nesuchykh i ohorodzhuvalnykh budivelnnykh konstruktsii ta osnov budivel i sporud. *Kyiv*, 2017. – 68s.
23. Posobyе po obsledovaniyu stroytelnykh konstruktsiyi zdanyi. *AO TsNYYPromzdanyi*. – M.: 1997.- 141s.
24. **DSTU-N B V.1.2-18:2016** Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu. – *Kyiv: DP «UkrNDNTs»*, 2017. – 44 s.
25. **UNI EN 473:2008-11.** Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel - General principles
26. **UNI CEI EN 45013:1990.** General criteria for certification bodies operating certification of personnel.
27. **Rudnieva I.N.** 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>

Technological features of metal structures strengthening by gluing of high-strength FRP-systems during reconstruction

Iryna Rudnieva

Summary. The building heritage of Ukraine includes numerous examples of metal structures, especially used in industrial buildings and for large-span structures. The use of metal structures in construction is primarily due to their mechanical properties. They are frost-resistant and can withstand temperatures down to -65 degrees, tough, resistant, durable and reliable. They can also be used in areas with increased seismic activity. But, in certain situations metal structures need to

restore or strengthen due to structural defects, wear of load-bearing elements, as well as in order to increase the bearing capacity. In some cases, strengthening with fiber-reinforced polymer composites (FRP) gives better results than traditional methods with metal strengthening.

A significant part of the Ukrainian architectural and historical heritage is made up of buildings and structures using metal structures. The first designs were made of cast iron or wrought iron (machined or tinned), but they subsequently developed rapidly along with the evolution of methods for forging mineral iron.

The main cultural reason for the restoration of old metal structures that guarantee structural functionality and load-bearing capacity, based not only on the need to preserve their historical origin, but also on the value of the landscape in which they are located.

Long-term operation of buildings and their structural elements made of metal without timely maintenance and major repairs, insufficient strength of structural materials, as well as changes in weather conditions and current regulatory documents in Ukraine, often leads to the need to recalculate the load-bearing metal structures of the building frame and strengthen them with the most effective methods, both from the point of view of reliability and from the point of view of profitability, which is influenced by prolonged shutdown of enterprises, stoppage of the production process or the inability to use the adjacent territory to carry out reconstruction work.

The article discusses the technological features of metal structures strengthening by gluing high-strength FRP-systems during the reconstruction of building, and also provides basic recommendations for the installation, monitoring and maintenance of strengthened elements.

Keywords. Composite materials; fibre-reinforced polymer FRP; defects; damage; reconstruction; strengthening of metal structures; inspection.