

УДК 624.014.2:624.072.2:624.046.4:624.059.32:678.5/8-419 doi:10.31650/2707-3068-2025-29-103-111

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЦЕНТРАЛЬНЕ СТИСНУТИХ МЕТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОВНІШНІМ ВУГЛЕЦЕВОВОЛОКОННИМ АРМУВАННЯМ

Дзюба С.В., к.т.н., доцент

pdo@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2413-9651

Згонніков К.С., здобувач ступеня доктор філософії

zgonnikov@odaba.edu.ua, ORCID: 0009-0000-6898-2168

Дзюба В.С., магістр будівництва та цивільної інженерії

tinvertin@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4892-544X

Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса

Анотація. В даній роботі визначено сфери раціонального використання та рівень доцільного підвищення навантажень при застосуванні зовнішнього вуглецевого фібропластикового армування для підвищення стійкості центральне стиснутих металевих елементів.

Представлений аналіз можливих ефективних рішень зовнішнього фібропластикового армування стиснутих металевих стержнів та сформульовані принципи прикладного визначення загальних параметрів їх стійкості.

При симетричному зовнішньому армуванні металевих стиснутих стержнів фібропластиками знижується їх загальна гнучкість, що забезпечується роботою зовнішнього посилення в зоні перерізу, що отримує розтягування у процесі втрати стійкості. Відповідно, представлені принципи практичного визначення загальної стійкості розглянутих конструкцій з урахуванням специфічних особливостей спільної роботи сталі та фібропластиків: значної різномодульності матеріалів, додаткових температурних напружень, що довантажують металеві елементи, практичної здатності фібропластиків ефективно сприймати тільки розтягуючи зусилля, що змінює робоче положення центру тяжкості перерізу при втраті стійкості, а також нездатністю фібропластикових систем, що передбачають адгезійне кріплення, повною мірою вступати в роботу у складі єдиної конструкції.

Існує необхідність у відповідній розробці прикладних методів визначення загальної стійкості вказаних елементів, заснованих на наявній нормативній базі розрахунку металевих конструкцій та обґрунтованих необхідними експериментальними дослідженнями.

Ключові слова: металеві конструкції, стиснуті елементи, стійкість стиснутих елементів, посилення стиснутих елементів, зовнішнє фібропластикове армування.

Вступ. При вирішенні ряду специфічних завдань, що визначають необхідність посилення стиснутих елементів металевих конструкцій, які знаходяться в експлуатації тривалий час, застосування традиційних методів підвищення несучої здатності, що передбачають зміну конструктивної форми, а також введення зварних або болтових з'єднань, не завжди є допустимим. У цих випадках підвищення несучої здатності, обмеженої стійкістю розглянутих елементів, стає можливим при використанні зовнішнього фібропластикового армування. При цьому необхідні методики практичного визначення параметрів стійкості металевих стиснутих стержнів, що враховують особливості спільної роботи сталі і фібропластиків, відсутні. Дана робота розглядає можливі ефективні рішення застосування фібропластиків для підвищення стійкості вказаних елементів та визначає загальні принципи дефініції відповідних параметрів.

Постановка проблеми. Процеси тривалої експлуатації будівельних конструкцій визначають широку необхідність відновлення або посилення існуючих перерізів їх несучих елементів. Стосовно металевих конструкцій ця необхідність обумовлюється можливими

змінami діючих навантажень, руйнуванням зовнішніх поверхонь елементів агресивними впливами навколишнього середовища, а також необхідністю зниження рівня діючих напружень, призначеного компенсувати зміни фізико-механічних властивостей матеріалу, що відбуваються під дією тривалих процесів його старіння або втоми.

Традиційні методи вирішення зазначеної проблеми передбачають розвиток геометричних характеристик поперечних перерізів різними комбінаціями додаткових елементів зовнішнього посилення, які встановлюються з використанням зварних або болтових з'єднань. При цьому, як правило, здійснення даних рішень стає можливим тільки при частковому або повному розвантаженні конструкцій.

Однак відносно конструкцій, що знаходяться в експлуатації тривалі періоди часу, реалізація традиційних методів посилення далеко не завжди є можливою. Металеві конструкції, що широко застосовувалися в другій половині XIX – на початку XX століть, виготовлялися з матеріалів, що не допускають використання зварювання, а ряд конструкцій, виготовлених у пізніші періоди, але які пробували у важких режимах експлуатації, демонструють деградацію властивостей матеріалу, що призводить до аналогічних обмежень. Введення ж болтових з'єднань часто сприяє значному ослабленню вже пошкоджених перерізів або є неприпустимим під час виконання робіт стосовно елементів, матеріали яких відрізняються підвищеною крихкістю. Проблема ускладнюється необхідністю розвантаження конструкцій, що попереджує здійсненню відповідних робіт.

Крім того, особливу групу складають конструкції, які входять до складу будівель та споруд, що віднесені до об'єктів архітектурно-будівельної спадщини. У цих випадках до збереження їх автентичного вигляду пред'являються особливі вимоги та модернізація відповідних елементів традиційними методами, які передбачають посилення, що змінює габарити та зовнішній вигляд конструкцій, є неприпустимим. Розвантаження ж таких елементів у більшості випадків стає можливим тільки при внесенні змін до існуючих конструктивних схем, що для розглянутих об'єктів також неприйнятно.

Мета роботи – аналіз можливих ефективних рішень зовнішнього фібропластикового армування стиснутих металевих стержнів та практичне визначення загальних параметрів їх стійкості.

Аналіз ефективних методів вирішення проблеми. Сучасним методом, що знаходить зростаюче застосування у світовій практиці будівництва і дозволяє забезпечувати відновлення несучої здатності розглянутих конструкцій, є модернізація елементів фіброармованими композитними матеріалами. Демонструючи потенційну можливість суттєвого підвищення несучої здатності конструкцій у майбутньому, але при цьому обладуючи рядом серйозних експлуатаційних недоліків, характерних в даний час для комерційно доступних систем посилення (підвищена чутливість до ряду атмосферних, температурних і вандалських впливів, екстремально низька вогнестійкість і т.д.), вони розглядаються як дієвий засіб підвищення рівня розрахункових навантажень від експлуатаційних до граничних значень (в межах сукупних коефіцієнтів надійності) [1-4].

Ефективне використання даних методів посилення щодо залізобетонних конструкцій мало місце з середини 80-х років минулого століття, а для металевих – з початку поточного століття. До переваг посилення фібрармованими композитами [1, 5-9] зазвичай відносять значне спрощення технології виробництва монтажних робіт, мала вага подібних систем посилення, високі міцнісні та пружні властивості армуючих матеріалів, стійкість до корозії і т.д. При цьому найбільш важливою з погляду відновлення конструкцій, особливо тих, що вимагають збереження автентичного зовнішнього вигляду, є можливість відновлення працездатності елементів без помітної зміни габаритних розмірів їх перерізів, що найбільш ефективно досягається при використанні тканинних матеріалів зовнішнього армування [1-4]. Що немало важливо, посилення конструкцій з використанням подібних методів у ряді випадків стає можливим без попереднього їх розвантаження.

Фібропластикові матеріали, виготовлені на основі армуючих волокон і полімерних з'єднувальних матриць, відрізняються гетерогенно-анізотропною природою і виявляють переважно лінійно-пружне деформування до моменту руйнування. Їх пружно-міцнісні властивості визначаються типом використовуваної фібри. З даної точки зору для посилення металевих конструкцій найбільшу ефективність демонструють вуглецеві пластики, виготовлені на основі високомодульних волокон, що мають модулі пружності, які перевищують аналогічний параметр сталі і дозволяють більшою мірою долучати до роботи високоміцний композитний матеріал, що дає низку переваг при підсиленні конструкцій під навантаженням [1, 2, 10, 11]. Тим не менш, певні переваги і недоліки мають всі види армуючих волокон, що широко використовуються в будівництві, і для відновлення перерізів елементів, які характеризуються незначними втратами робочого матеріалу, можуть успішно використовуватися більш дешеві скловолоконні та арамідоволоконні пластики [1, 4, 12, 13].

В якості матриць, що забезпечують взаємну роботу основного матеріалу конструкції та армуючих волокон, можуть використовуватись різні термопласти та термореактивні смоли (епоксидні, поліефірні, вінілєфірні тощо). Однак в якості найбільш ефективних і комерційно доступних зразків, застосованих для використання у складі металевих конструкцій в теперішній час, релевантні епоксидомісткі системи [1-3].

Слід зазначити, що процес армування металевих конструкцій вуглецевими елементами пов'язаний з серйозною проблемою прояву гальванічної корозії, що виникає при прямому контакті відповідних матеріалів. Як рішення зазначеної проблеми до складу адгезійного шва, що кріпить фібропластиковий елемент на поверхні конструкції, може вводиться так званий «нульовий» шар матеріалу, що складається зі скловолоконної тканини з товщиною моношару близько 0,05 мм, який виключає гальванічний контакт конструкційних матеріалів та практично не впливає на працездатність з'єднань [1, 2].

Конструктивні рішення, що використовуються при здійсненні аналізованих посилень, можуть передбачати застосування систем зовнішнього армування у складі елементів заводської готовності, виготовлених методами пултрузії або ламінації і приклеюваних до поверхонь конструкцій, а також, так званих, «мокрих» систем у складі елементів, що виготовляються за місцем посилення на поверхнях конструкцій шляхом укладання армуючих «сухих» волокон, стрічок або тканин з подальшим їх наповнення матричними сумішами [1-4]. Другий метод має більшу актуальність у поєднанні з конструкціями, що мають складну форму поперечних перерізів.

Природа фібропластикових матеріалів, що складаються з гнучких волокон та з'єднувальних матриць, визначає їх ефективну роботу при дії розтягуючих зусиль і практичну неспроможність сприйняття стискаючих зусиль, що і обумовило попередню практику використання даного армування у складі суто розтягнутих елементів або зон будівельних конструкцій, а також як засіб компенсації верхніх шарів матеріалу у складі перерізів, що зазнали істотних руйнувань. Спроби застосування фіброармування, і зокрема углеродоволоконних пластиків, щодо металевих стислих елементів зводилися до рішень, що передбачають їх бетонування по довжині у складі углеродоволоконних труб [14]. При цьому міцність і жорсткість таких елементів збільшувалася бетонною складовою, а композитні труби виступали в ролі розтягнутих обойм, що зовні обтискали бетон.

Необхідність посилення металевих конструкцій історичних об'єктів надалі сприяла першим емпіричним спробам посилення відповідних стиснутих елементів зовнішніми аплікаціями на основі вуглецевих тканин. Отримані результати свідчили про доцільність подібних рішень, що призводили до збільшення загальної несучої здатності та зниження небезпеки крихкого руйнування матеріалу.

У більш пізній період зовнішнє фібропластикове посилення стислих елементів у складі металевих конструкцій, що здійснювалося переважно на базі вуглецевоволоконних матеріалів, стало знаходити розширене практичне застосування [15, 16] та сприяло формуванню нового напрямку досліджень відповідних конструкцій.

Визначення принципів практичної дефініції загальної стійкості. Сучасний підхід до посилення металевих стиснутих елементів вуглецевими матеріалами розглядає останні як засіб підвищення несучої здатності за рахунок забезпечення більшої стійкості конструкцій. При симетричному зовнішньому армуванні відповідних стиснутих стержнів знижується їх загальна гнучкість, що забезпечується роботою зовнішнього посилення в зоні перерізу, що отримує розтягування у процесі втрати стійкості. Від зовнішнього ж армування, розташованого в стиснутої зоні стержня, що втрачає стійкість, через його практичну нездатність до сприйняття достатніх зусиль, традиційно абстрагуються.

Перспективність збільшення стійкості стиснутих металевих стрижнів зовнішнім армуванням вуглецевоволоконними матеріалами обмежується відсутністю необхідної теоретичної бази. Достатні рекомендації та норми розрахунку подібних посилень відсутні. При цьому проблема визначення параметрів підвищеного порогу втрати стійкості ускладнюється рядом факторів.

Сумісний розгляд роботи металів та фібропластиків вимагає врахування додаткових зусиль, що виникають внаслідок значних відмінностей у їх термічному деформуванні. Коефіцієнт лінійного температурного деформування будівельних сталей становить величину $12,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, в той час як вуглецевоволоконні пластики демонструють негативне температурне деформування з відповідними параметром, що знаходяться в діапазоні $(-0,6 \dots -1,45) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Таким чином, зміна температур у процесі експлуатації може призводити до помітного довантаження стиснутих металевих елементів, що вимагає відповідного врахування.

Нездатність зовнішнього фібропластикового армування дієво сприймати стискаючі зусилля, яке при визначенні параметрів стійкості призводить до врахування тільки ефективної частини перерізу, що включає металевий елемент і розтягнуту частину фібропластикового армування, визначає складність практичних розрахунків, пов'язану з необхідністю визначення методом послідовного наближення центру тяжкості такого перерізу.

Знижені пружно-міцнісні характеристики адгезійних шарів, що забезпечують спільну роботу основного матеріалу конструкції та зовнішнього вуглецевоволоконного армування (особливо за наявності «нульового», антигальванічного скловолоконного шару), не дозволяють елементам посилення вступати в роботу повною мірою і вимагають застосування щодо їх площ знижувальних коефіцієнтів [2, 17, 18].

На підставі вищесказаного, видається можливим використання для прикладного визначення параметра стійкості металевих центральностиснутих стержнів, зовні армованих фібропластиковими матеріалами, умови, визначеного діючими національними нормами [19], та трансформованої з урахуванням специфічних особливостей спільної роботи сталі та фібропластиків: додаткових температурних напружень, що довантажують металеві елементи, практичної здатності фібропластів ефективно сприймати тільки розтягуючі зусилля, що змінює робоче положення центру тяжкості перерізу, а також нездатністю фібропластикових систем, що передбачають адгезійне кріплення, повною мірою вступати в роботу у складі єдиної конструкції. Важливим параметром, який впливає на ступінь підвищення стійкості розглянутих стержнів, є різномодульність застосовуваних матеріалів:

$$\frac{N + N_{\Delta T}}{\varphi \cdot A_{ef} \cdot R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

де N – поздовжнє зусилля, прикладене по осі стержня; $N_{\Delta T}$ – поздовжнє зусилля в стержні, що виникає внаслідок різниці температурних деформацій сталі та фібропластиків; φ – коефіцієнт стійкості при центральному стиску [19]; A_{ef} – приведена площа ефективної частини перерізу стержня; $R_y \gamma_c$ – розрахунковий опір сталі за границею текучості з урахуванням коефіцієнту умов роботи.

Величина поздовжнього зусилля, що враховує неоднорідність температурного деформування складових перерізу, може бути визначена як:

$$N_{\Delta T} = E_f A_f \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T, \quad (2)$$

де E_f – модуль пружності матеріалу фібропластикового посилення; A_f – повна площа перерізу симетрично розташованого посилення, визначена відповідно до сумарної еквівалентної геометричної товщини шарів армуючого фібропластику; $\Delta \alpha = \alpha_f - \alpha_s$ – різниця коефіцієнтів лінійного температурного деформування фібропластика α_f та сталі α_s ; ΔT – розрахункова зміна температур експлуатації конструкції.

Величина приведенної площі ефективної частини перерізу стержня складе:

$$A_{ef} = A_s + A_f^{ef}, \quad (3)$$

де A_s – повна площа сталевий частини перерізу; A_f^{ef} – площа ефективної частини приведенного перерізу фібропластикового посилення (див. рис. 1), що бере участь у роботі на розтяг у процесі втрати стійкості стержня та визначається методом послідовного підбору з урахуванням приведенної ефективної розрахункової товщини фібропластика $t_f^{ef} = t_f \frac{E_f}{E_s}$; E_f, E_s – відповідно, модулі пружності фібропластика та сталі.

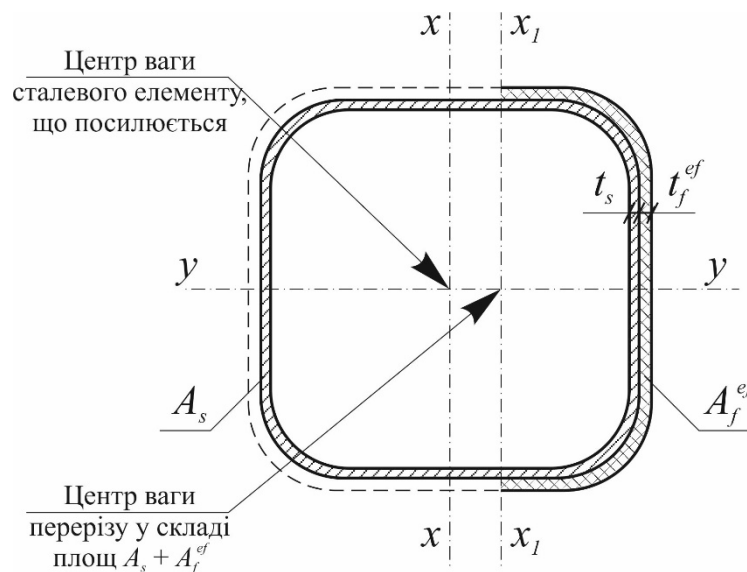


Рис. 1. Розрахункова схема перерізу у складі металевий елементу та частини фібропластиковий армування, що розтягується в процесі втрати стійкості стержня

Ефективна розрахункова товщина зовнішнього фібропластиковий армування, що враховує нерівномірність розподілу зусиль у складі багатошаровий фібропластиковий елементів, виготовлених з використанням високоміцних (нормально модульних $E_f = 240 \dots 280 \text{ ГПа}$) і високomodульних ($E_f = 390 \dots 760 \text{ ГПа}$) вуглецевоволоконних конструкційних стрічок та тканин, може бути визначена з урахуванням коефіцієнтів нерівномірності робочий деформацій k_i , що описані у [2, 17, 18] та встановлюють ступінь завантаженості окремих шарів даного матеріалу, тобто

$$t_f = \frac{t_{f1}}{n} \sum_{i=1}^n k_i, \quad (4)$$

где $n=1...5$ – кількість рівних по товщині моношарів армуючої фібри; t_{f1} – фізична товщина окремого моношару армуючої фібри; k_i – коефіцієнти нерівномірності завантаження шарів, рівні для *високоміцних (нормально модульних)* вуглецевих фібропластиків $k_1=1,0$, $k_2=0,73$, $k_3=k_4=k_5=0,17$, а для *високо модульних* вуглецевих фібропластиків $k_1=1,0$, $k_2=0,78$, $k_3=k_4=k_5=0,56$ (рис. 2).

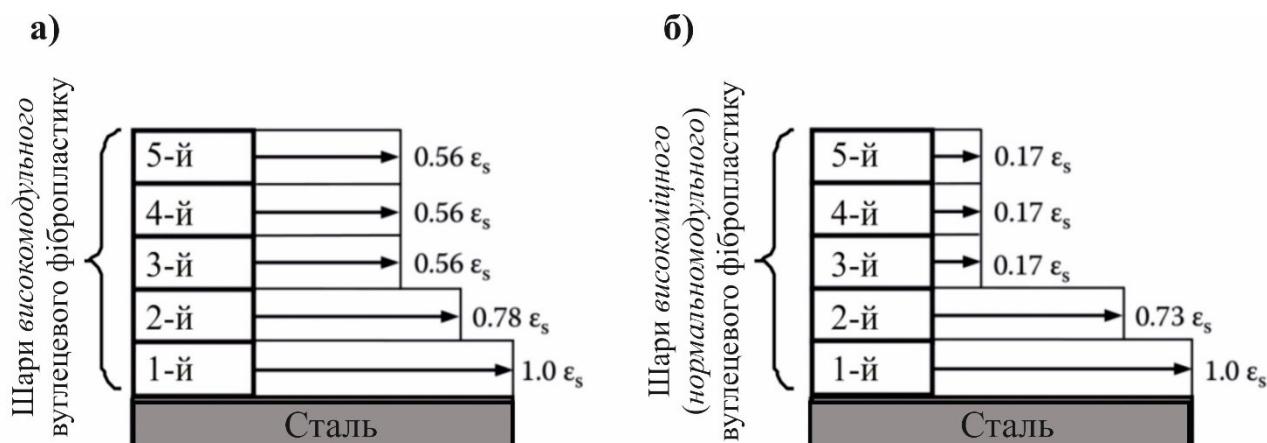


Рис. 2. Розподіл напружень у вуглецевоволоконних шарах зовнішнього фібропластикового армування сталевих елементів: а – при використанні *високо модульних* вуглецевих волокон, б – при використанні *високоміцних (нормально модульних)* вуглецевих волокон [17, 18]

Слід зазначити, що впровадження у практику проектування вищенаведених принципів визначення стійкості центральностиснутих стержнів, посиленіх зовнішнім фібропластиковим армуванням, потребує відповідного експериментального обґрунтування.

Немаловажним для розрахунку аналізованих конструкцій також є те, що серйозну складність для аналізованих посилень кінцевої довжини також становить крайня форма анізотропії поздовжньо армованих пластиків, міцнісні властивості яких фактично забезпечуються тільки в одному напрямку, що провокує появу значних концентрацій напружень по кінцях клейових з'єднань і сприяє в процесі втрати загальної стійкості прояву відшаровуючих напружень, що у свою чергу може вимагати введення додаткових механічних кріплень по кінцях елементів зовнішнього армування [1-4].

Наприкінці зазначимо, що розгляд існуючої теоретичної бази посилення металоконструкцій фіброармованими пластиками ставить ряд завдань щодо підвищення загальної стійкості стиснутих стержнів. Доцільним видається розробка прикладних методів відповідного посилення та розрахунку, заснованих на наявній нормативній базі розрахунків металевих конструкцій. В теперішній час потрібна відповідна систематизація та адаптація існуючої світової практики посилення фібропластиками розглянутих елементів та формування відповідних вітчизняних норм.

Висновок. Для вирішення ряду специфічних завдань посилення стиснутих елементів металевих конструкцій, ефективним засобом, що дозволяє підвищити рівень розрахункових навантажень від експлуатаційних до граничних значень, є зовнішнє армування вуглецевоволоконними композитами. Приведено аналіз можливих рішень та сформульовані

відповідні принципи прикладного визначення загальної стійкості вказаних конструкцій. Наведене потребує експериментального обґрунтування.

Література

1. Дзюба С.В. Фибропластиковые системы в современном строительстве. – Одесса: ОГАСА, 2018. – 407 с.
2. Xiao-Ling Zhao. FRP-Strengthened Metallic Structures. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – 247 p.
3. Cadei, J.M.C., Stratford, T.J., Hollaway, L.C., and Duckett, W.G. Strengthening Metallic Structures Using Externally Bonded Fiber-Reinforced Composites, C595. – London: CIRIA, 2004.
4. 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, June, 2007. – 57 p.
5. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Edited by L.C. Hollaway and J.G. Teng. – Woodhead Publishing Limited and Maney Publishing Limited on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2008. – 398 p.
6. Moy, S.S.J. FRP Composite: Life Extension and Strengthening of Metallic Structures: ICE Design and practice guide. – London: Thomas Telford, 2001.
7. CNR-DT 200/2004 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC structures, masonry structures. ROME – CNR, July 13th, 2004. – 144 p.
8. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Edited by L.C. Hollaway and J.G. Teng. – Woodhead Publishing Limited and Maney Publishing Limited on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2008. – 398 p.
9. Mortensen, A. Concise Encyclopedia of Composite Materials. – Pergamon, 2007. – 958p.
10. Дзюба С.В., Стоянов В.В. Проблемы усиления стенок металлических цилиндрических вертикальных резервуаров / Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сборник научных трудов ОГАСА. – Одесса: ОДАБА, 2015 – С. 40-65.
11. Дзюба С.В., Стоянов В.В. Усиление стенок металлических цилиндрических резервуаров направленно-ориентированными фибропластиковыми материалами // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. научных трудов ОГАСА. – Одесса: ОДАБА, 2015. – С. 66-78.
12. Дзюба С.В., Михайлов О.О. Підсилення корпусів металевих циліндричних резервуарів зовнішнім поперечним фібропластиковим армуванням з урахуванням впливу температурних деформацій / Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини / Зб. наукових праць ОДАБА, 2018. –С. 8-23.
13. Dziuba S.V., Korobko, O.O., Beshpalova, A.V. Effectiveness of strengthening cases of metallic cylindrical tanks by frp reinforcement based on fibers of different types / Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини / Зб. наукових праць ОДАБА, 2024. –С. 5-15.
14. Xiangdong Liu, Antonio Nanni, Pedro Franco Silva, Roger A. Laboube. Rehabilitation of steel bridge columns with frp composite materials / University of Missouri-Rolla, USA. – 11p.
15. Jakub Marcinowski, Zbigniew Rózycki and Volodymyr Sakharov. Numerical Simulations of Destructive Tests of Cast Iron Columns Strengthened with a CFRP Coating / Materials 2020, 13, 4608; doi:10.3390/ma13204608 – 18p.
16. Rajai Al-Rousan, Osama Nusier, Khairedin Abdalla, Mohammad Alhassan and Nikos D. Lagaros. NLFEA of Sulfate-Damaged Circular CFT Steel Columns Confined with CFRP Composites and Subjected to Axial and Cyclic Lateral Loads / Buildings 2022, 12, 296; doi10.3390/buildings12030296 – 18p.

17. Liu, H.B., Al-Mahaidi, R., and Zhao, X.L. Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures // *Composite Structures*, 90(1), 2009. –P. 12–20.
18. Liu, H.B., Xiao, Z.G., Zhao, X.L., and Al-Mahaidi, R. 2009. Prediction of fatigue life for CFRP strengthened steel plates // *Thin-Walled Structures*, 47(10), 2009. –P. 1069–1077.
19. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ: Мінрегіон України, 2014. – 205 с.

References

- [1]. Dzyuba S.V. *Fibroplastykovi systemy v suchasnomu budivnytstvi*. Odessa: ODABA, 2018. 407 s.
- [2]. Xiao-Ling Zhao. *FRP-Strengthened Metallic Structures*. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – 247 p.
- [3]. Cadei, J.M.C., Stratford, T.J., Hollaway, L.C., and Duckett, W.G. *Strengthening Metallic Structures Using Externally Bonded Fiber-Reinforced Composites, C595*. – London: CIRIA, 2004.
- [4]. 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, June, 2007. – 57 p.
- [5]. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Edited by L.C. Hollaway and J.G. Teng. – Woodhead Publishing Limited and Maney Publishing Limited on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2008. – 398 p.
- [6]. Moy, S.S.J. *FRP Composite: Life Extension and Strengthening of Metallic Structures: ICE Design and practice guide*. – London: Thomas Telford, 2001.
- [7]. CNR-DT 200/2004 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. *Materials, RC and PC structures, masonry structures*. ROME – CNR, July 13th, 2004. – 144 p.
- [8]. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Edited by L.C. Hollaway and J.G. Teng. – Woodhead Publishing Limited and Maney Publishing Limited on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2008. – 398 p.
- [9]. Mortensen, A. *Concise Encyclopedia of Composite Materials*. – Pergamon, 2007. – 958p.
- [10]. Dzyuba S.V., Stoyanov V.V. Problemy usylenyya stenok metallicheskykh tsylindricheskykh vertykal'nykh rezervuarov / *Sovremennyye stroytel'nye konstruktsyy yz metalla y dereva / Sbornyk nauchnykh trudov ODABA*. – Odessa: ODABA, 2015 – S. 40-65.
- [11]. Dzyuba S.V., Stoyanov V.V. Posylennyya stinok metalevykh tsylindrichnykh rezervuariv spryamovano-oriyentovanymy fibroplastikovymy materialamy // *Suchasni budivel'ni konstruktsiyi z metalu ta derevyny / Zb. naukovykh prats' ODABA*. - Odesa: ODABA, 2015. - S. 66-78.
- [12]. Dzyuba S.V., Mikhaylov A.A. Usileniye korpusov metallicheskiykh tsilindricheskiykh rezervuarov naruzhnym poperechnym fibroplastikovym armirovaniyem s uchetom vozdeystviya temperaturnykh deformatsiy / *Sovremennyye stroitel'nyye konstruktsii iz metalla i drevesiny / Sb. nauchnykh trudov ODABA*, 2018. –S. 8-23.
- [13]. Dziuba S.V., Korobko, O.O., Bepalova, A.V. Effectiveness of strengthening cases of metallic cylindrical tanks by frp reinforcement based on fibers of different types / *Suchasni budivel'ni konstruktsiyi z metalu ta derevyny / Zb. naukovykh prats' ODABA*, 2024. -S. 5-15.
- [14]. Xiangdong Liu, Antonio Nanni, Pedro Franco Silva, Roger A. Laboube. Rehabilitation of steel bridge columns with frp composite materials / *University of Missouri-Rolla, USA*. – 11p.

- [15]. Jakub Marcinowski, Zbigniew Rózycki and Volodymyr Sakharov. Numerical Simulations of Destructive Tests of Cast Iron Columns Strengthened with a CFRP Coating / Materials 2020, 13, 4608; doi:10.3390/ma13204608 – 18p.
- [16]. Rajai Al-Rousan, Osama Nusier, Khairidin Abdalla, Mohammad Alhassan and Nikos D. Lagaros. NLFEA of Sulfate-Damaged Circular CFT Steel Columns Confined with CFRP Composites and Subjected to Axial and Cyclic Lateral Loads / Buildings 2022, 12, 296; doi:10.3390/buildings12030296 – 18p.
- [17]. Liu, H.B., Al-Mahaidi, R., and Zhao, X.L. Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures // Composite Structures, 90(1), 2009. –P. 12–20.
- [18]. Liu, H.B., Xiao, Z.G., Zhao, X.L., and Al-Mahaidi, R. 2009. Prediction of fatigue life for CFRP strengthened steel plates // Thin-Walled Structures, 47(10), 2009. –P. 1069–1077.
- [19]. DBN V.2.6-198:2014 Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya. – Kyiv: Minrehion Ukrayiny, 2014. – 205 s.

INCREASING THE STABILITY OF CENTRALLY COMPRESSED METAL ELEMENTS BY EXTERNAL CFRP REINFORCEMENT

Dziuba S.V., Ph.D., Associate Prof.

pdo@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2413-9651

Zhonnikov K.S., PhD candidate

zgonnikov@odaba.edu.ua, ORCID: 0009-0000-6898-2168

Dziuba V.S., Master of Civil Engineering

tinvertin@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4892-544X

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa

Abstract. This work recognizes areas of rational use and the level of appropriate load increase for using external CFRP reinforcement to increase the stability of centrally compressed metal elements.

An analysis of possible effective solutions for external CFRP reinforcement of compressed metal struts is presented and the principles of applied determination of general parameters of their stability are formulated.

With symmetrical external reinforcement of compressed metal struts by FRP, their overall flexibility is reduced, which is ensured by the work of external reinforcement in the cross-sectional area that receives tension in the process of losing stability. Accordingly, the principles of practical determination of the overall stability of the considered structures are presented, taking into account the specific features of the combined operation of steel and FRP: significant heteromodulus of materials, additional temperature stresses that add to the load on the metal elements, the practical ability of FRP to effectively perceive only tensile forces, which changes the working position of the center of gravity of the cross-section upon loss of stability, as well as the inability of FRP systems that involve adhesive fastening, to be fully operational as part of a whole structure.

Currently, there is a need for appropriate systematization and adaptation of existing global practices for reinforcing the elements in question with fiber plastics and for developing corresponding domestic standards.

There is a need for appropriate development of applied methods for determining the overall stability of specified elements, based on the existing national regulatory framework for the calculation of metal structures and substantiated by the necessary experimental studies.

Key words: metal structures, compressed elements, stability of compressed elements, reinforcement of compressed elements, external FRP reinforcement.